

**Desenvolvimento de um concentrador parabólico  
Martifer ENER-Q**

*Romeu Martins de Matos*

**Relatório do projecto final do MIEM**

Orientador na MARTIFER ENER-Q: Dr. Pedro Correia Carvalho

Orientador na FEUP: Prof. Armando Oliveira



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho de 2009



## Resumo

Neste projecto, pretende-se desenvolver um colector solar com um concentrador parabólico. Como ponto de partida existia um protótipo, e o objectivo era colocá-lo em funcionamento, e, se possível, desenvolvê-lo de forma a melhorar o seu rendimento. O objectivo final do produto é a obtenção de rendimentos elevados (30 a 40%) para aquecimento de fluidos (óleo térmico, vapor de água, entre outros) até 250°C. As aplicações vão desde a produção de vapor à dessalinização ou micro co-geração.

No trabalho estas temperaturas nunca foram atingidas, porque para tal acontecer seriam necessárias alterações profundas no sistema de acumulação de energia, impossíveis de conceber num período de tempo tão curto. O objectivo passava por evoluir o concentrador de forma a ir detectando os problemas e resolvendo-os.

O concentrador apresentava, à partida, alguns problemas de base, nomeadamente materiais do concentrador e forma deste, assim como forma do absorvedor. Numa primeira fase melhorou-se o absorvedor, mas tendo sido verificado que o rendimento pouco se alterou decidiu-se analisar e melhorar o concentrador.

Numa segunda fase foi construído um concentrador novo, com um material diferente, mais eficiente. Aqui foi importante definir um bom método de construção da parábola de forma a garantir a correcta concentração da radiação solar. Verificou-se nessa altura que o rendimento subiu consideravelmente, tendo a parábola ficado a funcionar, embora com valores de rendimento inferiores ao pretendido. Porém, nesta altura, o grande objectivo deste trabalho tinha sido atingido, isto é, analisar o porquê do não funcionamento do equipamento e colocar o mesmo operacional.

O passo seguinte foi construir um novo absorvedor baseado no que o mercado também utiliza, um tubo de vidro concêntrico com o tubo de cobre. Desta maneira pretendeu-se minimizar as perdas para o exterior a temperaturas elevadas. Nesse momento, o rendimento a altas temperaturas foi incrementado, embora os materiais usados não fossem do melhor que o mercado nos pode oferecer.

De referir que durante todo este trabalho foram também resolvidos e identificados outros problemas; como aspectos de resistência ou funcionamento de motores eléctricos de movimentação. Foram também identificados problemas existentes no tracking, que se deviam ao facto dos sensores “lerem” radiação total e não apenas a radiação directa.

Foi também feita a transferência de local do equipamento e montagem de outro acumulador, assim como todo o equipamento auxiliar (bomba, centralina, termómetros, tubagem e respectivo isolamento).





## **Development of parabolic through concentrator**

In this project, we would like to develop a solar collector with a parabolic concentrator. As a starting point, there was a prototype, and the aim was to put it into operation and, if possible, develop it to improve its performance. The ultimate goal of the product is to obtain high efficiency (30 to 40%) for heating of fluids (oil heat, water vapor, among others) to 250° C. The applications range from the production of steam is desalination or micro co-generation.

These temperatures were never reached on our experiences, because this happens to be necessary changes at the accumulation energy system, impossible to conceive in a very short period of time. The aim was to develop the concentrator in order to go detecting problems and solving them.

The concentrator was, at the outset, the basic problem, including the materials and form of it and so the absorber. Initially the absorber was improved, but it was found little changes at efficiency so we decided to analyze and improve the concentrator.

A new concentrator was built at the second stage, with a different material and more efficiently. It was important to define a good method of construction of the parabola to ensure the proper concentration of solar radiation. This revealed a considerably increased on the efficiency and the parabola started running, although with lower values of the desired income. At this point, the major objective of this work had been achieved, which was analyzing the reasons of failure of equipment and then put it operational.

The next step was to build a new absorber based on the market that also uses a concentric glass tube with the copper pipe inside. With this we intended to minimize losses to the outside at high temperatures. At that time, the efficiency was increased at high temperatures, although the materials used were not the best that the market could offer.

To note that throughout this work were also identified and solved other problems, such as resistance or operation of drive electric motors. It was also identified problems in the tracking system which was due to the fact that the sensors "read" total radiation and not only the direct radiation. Besides all that, we also made the change of location of the equipment, the assembly of other accumulator and of all the auxiliary equipment (pump, thermometers, tubing and the insulation).



## **Agradecimentos**

Queria agradecer à MARTIFER ENER-Q, nomeadamente ao administrador, Dr. Pedro Correia de Carvalho, a oportunidade de poder realizar o meu trabalho de final do curso estagiando num ambiente empresarial.

Agradecer também a todos os colaboradores da empresa, em especial os que trabalharam directamente comigo. Ao Celso Jacob o tempo, ajuda e ensinamentos, para além do apoio incondicional que me deu, pelas longas horas pela noite dentro passadas.

Ao José Carlos Gonçalves e aos colaboradores da produção a ajuda prestada na construção da parábola.

Agradecer à Laura Almeida por disponibilizar livros sobre o assunto.

Ao meu colega da faculdade também em estágio, o Fernando Ferreira, o companheirismo e a ajuda prestada, e à irmã, Elisa Ferreira, o auxílio prestado na elaboração do relatório.

Agradecer ao orientador, o professor Armando Oliveira, o tempo e a ajuda prestada, assim como ao professor Clito Afonso pela oportunidade que me foi concedida e pelas ajudas de foro profissional que me deu.

Por fim agradecer a toda a minha família por me terem apoiado nos momentos menos felizes e por celebrarem comigo os mais favoráveis.

Agradecimento final (os últimos são sempre os primeiros) à minha companheira, Mariana Barros, que esteve comigo “nesta guerra”, pelas horas passadas à minha espera, e pelo tempo que gastou a ouvir-me.



## Índice de conteúdos

Resumo .....	iii
Development of parabolic through concentrator .....	v
Agradecimentos .....	vii
Lista de figuras .....	xiii
1. Lista de Tabelas .....	xix
2. Introdução .....	1
1.1 Apresentação da empresa MARTIFER ENER-Q .....	1
1.2 Apresentação do projecto de colector do tipo concentrador parabólico na MARTIFER ENER-Q .....	3
1.3 Estudo e desenvolvimento do protótipo do concentrador parabólico .....	6
2. Fundamentos teóricos .....	9
2.1. Foco do concentrador .....	9
2.1.1. Parábola .....	9
2.1.2. Cilindro .....	12
2.2. Breve descrição dos conceitos de transferência de calor .....	13
2.3. Concentrador .....	15
2.4. Absorvedor .....	16
2.4.1. Tubos de vácuo .....	16
2.4.2. Tubo com vidro .....	20
2.4.3. Tubo com isolamento na parte superior .....	28
2.5. Sistema de acompanhamento do sol (Tracking) .....	29
3. Protótipo 1 .....	33
3.1 Modelação no EES .....	34
3.1.1. Descrição do absorvedor .....	34
3.1.2. Pontos da modelação a considerar no tubo do absorvedor .....	34
3.1.3. Pontos da modelação a considerar no isolamento do absorvedor .....	36
3.1.4. Pontos a considerar na modelação para o fluído que circula no absorvedor .....	36
3.1.5. Análise do comportamento do concentrador .....	38
3.1.6. Análise da transferência de calor no absorvedor .....	43
3.1.7. Condução no tubo de cobre do absorvedor .....	44
3.1.8. Transferência de calor por convecção para o fluído no interior .....	46
3.1.9. Transferência de calor por convecção do absorvedor para o exterior .....	50
3.1.10. Equações da modelação para o absorvedor .....	56

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

3.1.11.	Análise do depósito .....	56
3.2	Construção do protótipo .....	59
3.3	Dimensões .....	61
3.3.1	Concentrador .....	61
3.3.2	Absorvedor .....	62
3.4	Instalação .....	63
3.5	Resultados da modelo teórico e experimental .....	63
3.6	Conclusões .....	64
4.	Protótipo 2 .....	65
4.1.	Modelação .....	66
4.2.	Instalação .....	68
4.3.	Resultados da modelo teórico e experimental .....	68
4.4.	Conclusões .....	69
5.	Protótipo 3 .....	71
5.1.	Construção .....	71
5.2.	Dimensões .....	75
5.3.	Resultados da modelo teórico e experimental .....	76
5.4.	Conclusões .....	77
6.	Protótipo 4 .....	79
6.1.	Modelação .....	79
6.2.	Construção .....	80
6.3.	Instalação .....	82
6.4.	Correlação para radiação directa .....	82
6.4.1.	Correlação segundo Rabl .....	83
6.4.2.	Correlação segundo Dufie .....	84
6.5.	Resultados da modelo teórico e experimental .....	85
6.5.1.	Teste com acumulador de 500l .....	85
6.5.2.	Teste com acumulador de 150l .....	88
6.6.	Conclusões .....	90
6.6.1.	Reflectividade do concentrador e efeito das condições atmosféricas .....	90
6.6.2.	Tracking .....	91
7.	Protótipo 5 .....	93
7.1.	Modelação .....	93
7.2.	Construção .....	95

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

7.3.	Dimensões.....	99
7.4.	Resultados da modelo teórico e experimental .....	100
7.4.1.	Comparação entre modelos em EES .....	100
7.4.2.	Teste a baixas temperaturas .....	101
7.4.3.	Teste a temperaturas elevadas .....	103
7.5.	Conclusão.....	105
8.	Conclusões.....	109
8.1.	Conclusão.....	109
8.2.	Trabalhos futuros .....	110
9.	Referências e Bibliografia .....	111
10.	Anexo A.....	113
11.	Anexo B.....	121
12.	Anexo C.....	141
	Anexo D.....	143
	Protótipo 1 .....	143
	Protótipo 2 .....	144
	Protótipo 3 .....	145
	Protótipo 4 500l.....	146
	Protótipo 4 150l.....	147
	Protótipo 5 temperaturas baixas .....	148





## Lista de figuras

Figura 1 - Autodromo Internacional do Algarve .....	2
Figura 2 - Kit termossifão de 300l.....	2
Figura 3 - Curva de rendimento de típica de alguns colectores e aplicações .....	3
Figura 4 - Princípio de funcionamento de um colector do tipo concentrador parabólico .....	4
Figura 5 - Razão de concentração.....	4
Figura 6 - Utilização de vapor de água na indústria .....	5
Figura 7 - Produção de energia eléctrica com recurso a concentradores parabólicos .....	6
Figura 8 - Absorvedor original .....	7
Figura 9 - Curvas de algumas parábolas.....	10
Figura 10 - Caracterização da reflexão e refacção .....	10
Figura 11 - Foco numa parábola.....	11
Figura 12 - Cálculo do foco da parábola .....	12
Figura 13 - Estudo foco de circunferência.....	13
Figura 14 - Condução em cilindros .....	13
Figura 15 - Convecção forçada.....	14
Figura 16 - Lei de Planck .....	14
Figura 17 - Reflexão .....	14
Figura 18 - Comportamento de concentrador com reflexão difusa .....	15
Figura 19 - Tubo de vácuo com dois tubos concêntricos .....	17
Figura 20 - Tubo de vácuo com dois tubos de cobre.....	17
Figura 21 - Construção de um tubo de vácuo.....	18
Figura 22 - Tubo de calor .....	18
Figura 23 - Tubo de vácuo.....	19
Figura 24 - Indicador da presença de vácuo .....	19
Figura 25 - Solução com tubo de vidro .....	20
Figura 26 - Transmissibilidade de vários vidros .....	21
Figura 27 - Emissividade do tubo para temperatura de 270°C .....	21
Figura 28 - Efeito de estufa .....	22
Figura 29 - Variação da transmissibilidade do vidro com o ângulo de incidência.....	23
Figura 30 - Superfície selectiva .....	24
Figura 31 - Aplicação de selectivo .....	24
Figura 32 - Relação entre absorção e ângulo de incidência .....	25
Figura 33 - Tubos de cobre normalmente usados.....	25

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Figura 34 - Convecção entre um cilindro e uma tubo achatado concêntricos .....	26
Figura 35 - Transferência de calor entre dois cilindro concêntricos.....	27
Figura 36 - Equações para cálculo da posição do sol .....	29
Figura 37 - Sensores colocados a 90° e colocados a 80°.....	30
Figura 38 - Incorrecto posicionamento da parábola no azimute.....	31
Figura 39 - Imagem do foco fora do local .....	31
Figura 40 - Desenho 3D e protótipo da primeira evolução.....	33
Figura 41 - Pontos do absorvedor na modelação no EES .....	34
Figura 42 - Camada limite térmica no tubo .....	37
Figura 43 - Evolução da temperatura do fluido ao longo do absorvedor e situação considerada .....	37
Figura 44 - Transferência de calor no concentrador .....	38
Figura 45 - Evolução da camada limite num escoamento exterior numa placa plana.....	39
Figura 46 - Janela do EES para calcular coeficiente de convecção numa placa plana .....	39
Figura 47 - Evolução do coeficiente convecção numa placa plana para diferentes valores da temperatura superficial .....	40
Figura 48 - Janela do EES para calcular coeficiente de convecção num cilindro com vento a incidir na perpendicular ao eixo .....	40
Figura 49 - Evolução do coeficiente convecção num cilindro para diferentes valores da temperatura superficial .....	41
Figura 50 - Evolução da temperatura do concentrador com o coeficiente de convecção.....	42
Figura 51 - Esquema com transferência de calor no absorvedor .....	43
Figura 52 - Temperatura no tubo do absorvedor (azul mais fria e vermelha mais quente) .....	45
Figura 53 - Variação da temperatura ao longo do tubo.....	46
Figura 54 - Curva da bomba Grundfos 15-40 130 .....	48
Figura 55 - Janela do EES para calcular coeficiente de convecção no interior de um tubo ....	48
Figura 56 - Incidência no sentido do absorvedor.....	51
Figura 57 - Incidência na perpendicular ao absorvedor.....	52
Figura 58 - Evolução do coeficiente de convecção para placa plana com variação da temperatura e da velocidade do vento .....	52
Figura 59 - Escoamento em torno do absorvedor com vento na perpendicular.....	53
Figura 60 - Pormenor de possível perturbação no escoamento a zona inferior do absorvedor	53
Figura 61 - Evolução da camada limite na parte inferior do absorvedor.....	54
Figura 62 - Coeficiente de convecção na parte superior para um escoamento incidente na perpendicular .....	54

Figura 63 - Coeficiente de convecção na parte inferior para um escoamento incidente na perpendicular .....	55
Figura 64 - Esquema de transferência de calor no acumulador.....	57
Figura 65 - Janela do EES para convecção livre numa placa na vertical .....	58
Figura 66 - Janela EES para convecção forçada em torno de um cilindro, com vento a incidir na perpendicular .....	58
Figura 67 - 3D do absorvedor.....	59
Figura 68 - Fixação projectada entre isolamento e tubo.....	59
Figura 69 - Protótipo 1 .....	60
Figura 70 - Geometria do concentrador.....	61
Figura 71 - Dimensões gerais do absorvedor .....	62
Figura 72 - Esquema da instalação do protótipo 1 .....	63
Figura 73 - Comparação entre resultados experimentais e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 1 .....	64
Figura 74 - Protótipo em Oliveira de Frades .....	65
Figura 75 - Protótipo nas novas instalações .....	66
Figura 76 - Pontos do absorvedor.....	66
Figura 77 - Modelação da evolução das temperaturas em 3 e 4 para o protótipo 1 .....	67
Figura 78 - Modelação da evolução das temperaturas em 3 e 7 para o protótipo 2 .....	67
Figura 79 - Esquema da instalação do protótipo 1 .....	68
Figura 80 - Evolução das temperaturas durante o teste ao protótipo 2.....	68
Figura 81 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 2.....	69
Figura 82 - Chapa em alumínio da Alucenter.....	71
Figura 83 - Peças projectadas .....	72
Figura 84 - Fixação dos moldes para construção da parábola e contra-moldes .....	72
Figura 85 - Construção da nova parábola e pormenores de fixação.....	73
Figura 86 - Defeitos no concentrador do protótipo 3 (defeito tipo tolde) .....	74
Figura 87 - Dimensões gerais do concentrador do protótipo 3 .....	75
Figura 88 - Evolução das temperaturas durante o teste ao protótipo 3.....	76
Figura 89 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 3.....	76
Figura 90 - Curva da bomba Wilo .....	80
Figura 91 - Novo posicionamento dos sensores do Tracking da altura do sol .....	81
Figura 92 - Novo grupo hidráulico .....	81
Figura 93 - Instalação do protótipo 4 .....	82

Figura 94 - Tabela e gráfico para valores das constantes da recta em relação a $kt$ .....	83
Figura 95 - Gráfico e sistema de equações para radiação difusa na horizontal e lida .....	84
Figura 96 - das temperaturas durante o teste ao protótipo 4 com acumulador de 500l .....	85
Figura 97 - Rendimento do protótipo 4 com acumulador de 500l .....	85
Figura 98 - Transdutor de temperatura .....	86
Figura 99 - Transdutores analógicos .....	86
Figura 100 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 4, acumulador de 500l .....	87
Figura 101 - Evolução das temperaturas durante o teste ao protótipo 4 com acumulador de 150l .....	88
Figura 102 - Rendimento do protótipo 4 com o acumulador de 150l .....	88
Figura 103 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 4, acumulador de 150l .....	89
Figura 104 - Limpeza do concentrador com pormenor no estado em que ficava a superfície	90
Figura 105 - Posição da parábola ao nascer do sol e quando o sol está na posição mais alta .	91
Figura 106 - Actuais sensores e princípio de funcionamento de um pireliómetro .....	92
Figura 107 - Pontos da modelação para o tubo de vidro .....	93
Figura 108 - Tubo de cobre do absorvedor achatado .....	96
Figura 109 - Apoios entre tubo de cobre e vidro .....	96
Figura 110 - Espiral no interior do absorvedor .....	97
Figura 111 - Chapa reflectora riscada e baça .....	97
Figura 112 - Parábola com nova chapa reflectora .....	98
Figura 113 - Chapa reflectora protegida .....	98
Figura 114 - Dimensões do tubo de cobre .....	99
Figura 115 - Dimensões do absorvedor .....	99
Figura 116 - Curva de rendimento dos colectores (plano, protótipo 4 e 5 e protótipo original) .....	100
Figura 117 - Evolução das temperaturas durante o teste ao protótipo 5 com acumulador de 150l (baixas temperaturas) .....	101
Figura 118 - Rendimento do protótipo 5 a baixas temperaturas .....	102
Figura 119 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 4, acumulador de 150l a baixas temperaturas .....	102
Figura 120 - Evolução das temperaturas durante o teste ao protótipo 5 com acumulador de 150l (altas temperaturas) .....	103
Figura 121 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 4, acumulador de 150l a altas temperaturas .....	104

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Figura 122 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 4, acumulador de 150l a altas temperaturas.....	104
Figura 123 - Esquema do próximo tubo do absorvedor .....	105
Figura 124 - Ligações ao colector e tanque sem isolamento .....	106
Figura 125 - Isolamento com baixa espessura.....	106
Figura 126 - Zonas sem isolamento.....	107
Figura 127 - Bomba sem isolamento e serpentina destapada.....	107
Figura 128 – Esquema do teste pela norma EN 12976-2 .....	108
Figura 129 - Características do acumulador de 150l .....	118
Figura 130 - Características do acumulador de 500l .....	119
Figura 131 - Protótipo 1 e 4.....	142



## 1. Lista de Tabelas

Tabela 1 - Evolução da modelação com temperatura média aritmética e logaritmica .....	47
Tabela 2 - Ensaio para velocidade da bomba em III .....	49
Tabela 3 - Ensaio para velocidade da bomba em II.....	49
Tabela 4 - Modelação protótipo 1.....	63
Tabela 5- Resultados primeiro protótipo .....	64
Tabela 6 - Resultados do protótipo 1 .....	143
Tabela 7 - Resultados do protótipo 2.....	144
Tabela 8 - Resultados do protótipo 3.....	145
Tabela 9 - Resultados para o protótipo 4 com acumulador de 500l .....	146
Tabela 10 - Resultados para o protótipo 4 com acumulador de 150l a baixas temperaturas..	147
Tabela 11 - Resultados para o protótipo 4 com acumulador de 150l a altas temperaturas ....	147
Tabela 12 - Resultados para protótipo 5 com o acumulador de 150l a baixas temperaturas..	148
Tabela 13 - Resultados para protótipo 5 com o acumulador de 150l a altas temperaturas ....	148





## 2. Introdução

No âmbito da disciplina final do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, a disciplina de Tese/Projecto proporciona aos alunos uma vertente onde podem estagiar em numa empresa em parceria com a faculdade; neste contexto, foi proporcionado um estágio na MARTIFER ENER-Q, onde foi possível ganhar experiência prática, relacionando os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso com a prática.

O estágio tinha como objectivo primordial o desenvolvimento de um colector solar do tipo concentrador parabólico, colocando o protótipo existente a funcionar correctamente e, se possível, incrementar o seu rendimento.

Como o protótipo não funcionava correctamente, havia à partida duas opções: fazer um protótipo totalmente novo, mesmo que baseado no existente, e retirando ilações dos problemas que nele existissem; ou, então partir para uma fase onde se iria tentar evoluir o existente. Foi tomada a primeira opção, desenvolver o existente, passo-a-passo, registando e analisando as consequências das alterações efectuadas. Assim é mais fácil de perceber o funcionamento do concentrador, sendo por isso, o mais indicado para quem tem pouca experiência.

O relatório apresenta uma estrutura com base no espaço temporal em que as evoluções foram sendo efectuadas, isto é, a primeira alteração é a evolução 1, a segunda é a evolução 2, até à última alteração efectuada. Inicialmente será feita uma breve introdução aos princípios teóricos onde estão alicerçados este tipo de colectores, e um estudo do protótipo final proposto, visto que esse protótipo foi o mais estudado ao longo do tempo.

Ainda neste capítulo será feita uma breve apresentação da empresa, do projecto e do protótipo existente.

### 1.1 Apresentação da empresa MARTIFER ENER-Q

A MARTIFER ENER-Q foi criada em 2008 e pertence ao grupo MARTIFER.

O grupo MARTIFER foi criado em 1990, sendo inicialmente uma pequena empresa no ramo das construções metálicas. Ao longo dos anos a empresa foi crescendo e fortalecendo-se, mas um dos grandes passos foi dado quando ficou responsável pela construção da Expo 98. Outro grande marco na empresa foi quando ficou responsável pela construção de 6 dos 10 estádios de Euro 2004, realizado em Portugal.

Actualmente a MARTIFER é líder do mercado ibérico de construções, e é uma das 5 maiores empresas de construções da Europa. Deixou de ser também uma empresa dedicada exclusivamente ao ramo das construções metálicas, tendo nesta altura várias empresas de diversos sectores no grupo. Neste momento a empresa está dividida em grandes grupos, como a MARTIFER CONSTRUÇÕES, a MARTIFER INOX, a MARTIFER ALUMINIOS, a VENTI POWER, a PRIO, e a MARTIFER SOLAR à qual a MARTIFER ENER-Q pertence.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

A ENER-Q apresenta soluções de energias térmicas renováveis. A empresa iniciou a actividade desenvolvendo grandes projectos na área da térmica de edifícios e do consumo de águas quentes sanitárias. Projectos como o Parkalgar, com o Autódromo Internacional do Algarve, o aeroporto de Lisboa da ANA foram desenvolvidos e executados pela ENER-Q. Pode também referir-se que existem projectos aliantes em curso, como por exemplo as termas de S. Vicente, assim como alguns projectos internacionais.



Figura 1 - Autodromo Internacional do Algarve

A MARTIFER ENER-Q passou a dedicar-se à construção dos seus próprios colectores no primeiro trimestre de 2009, tendo certificado (solar Keymark) três gamas de produtos. A empresa pretende comercializar produtos com a própria marca como também fabricar produtos OEM (Original Equipment Manufacturing). Para além de disponibilizar colectores solares, ambiciona também comercializar kits termossifão de 200l, 300l e 300l de circulação forçada, ainda no 3º trimestre do ano.



Figura 2 - Kit termossifão de 300l

A ENER-Q pretende também entrar rapidamente no mercado das bombas de calor, estando para isso a desenvolver uma bomba de calor com alta eficiência [ $COP > 4$ ] para aquecimento de AQS, e aquecimento e arrefecimento para conforto térmico. Esta máquina pretende servir de apoio aos painéis solares.

## 1.2 Apresentação do projecto de colector do tipo concentrador parabólico na MARTIFER ENER-Q

A energia solar é talvez, de entre as fontes renováveis de energia aquela que mais tem para nos oferecer e a que está, por ventura, pior aproveitada nesta altura. O aproveitamento directo da energia solar pode dividir-se em dois grandes grupos; a fotovoltaica, onde a energia solar é transformada directamente em energia eléctrica, e a vertente térmica, onde a energia solar é transformada em calor. É neste último ramo que se insere o objecto de estudo.

Os colectores solares térmicos do tipo concentrador parabólico fazem parte de um grupo (os colectores térmicos) onde a energia solar é aproveitada para aquecer um fluido. Naturalmente, o fluido é dependente da temperatura que se pretende que este atinja.

Os colectores são caracterizados energeticamente, pelo rendimento óptico e as perdas para o exterior. O rendimento óptico caracteriza a quantidade de energia solar que chega efectivamente ao fluido, este depende num colector plano da absorção do absorvedor e da transmissibilidade do vidro. As perdas para o exterior são referidas à quantidade de calor que o fluido perde por estar a uma temperatura mais elevada que o meio ambiente. Num colector convencional, ou seja, num colector plano o rendimento óptico anda em torno de 75%, isto é, cerca de 75% da energia solar que chega ao colector é absorvida pelo fluido. As perdas para o exterior são cerca de  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ou seja, perde-se 5 W por metro quadrado da área do colector, por grau Kelvin de diferença entre a temperatura de entrada do fluido (ou média) e a exterior.

Os colectores planos convencionais, por apresentarem uma área de perdas considerável apresentam limites ao ganho energético, sendo que a partir de  $80/90^\circ\text{C}$  as perdas para o exterior são tão grandes e o rendimento do colector baixa consideravelmente. Por isso, existem outras soluções quando se quer ter temperaturas elevadas de serviço.

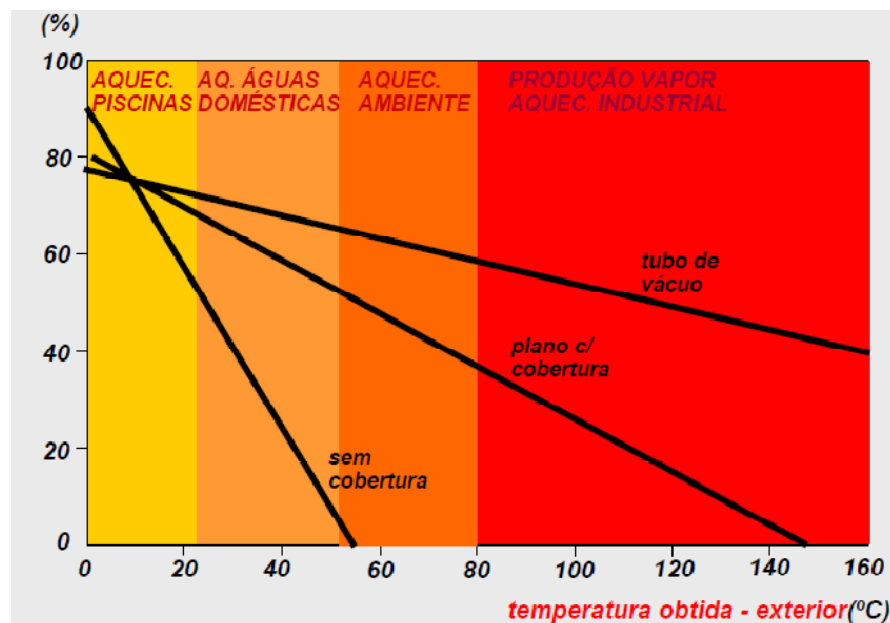
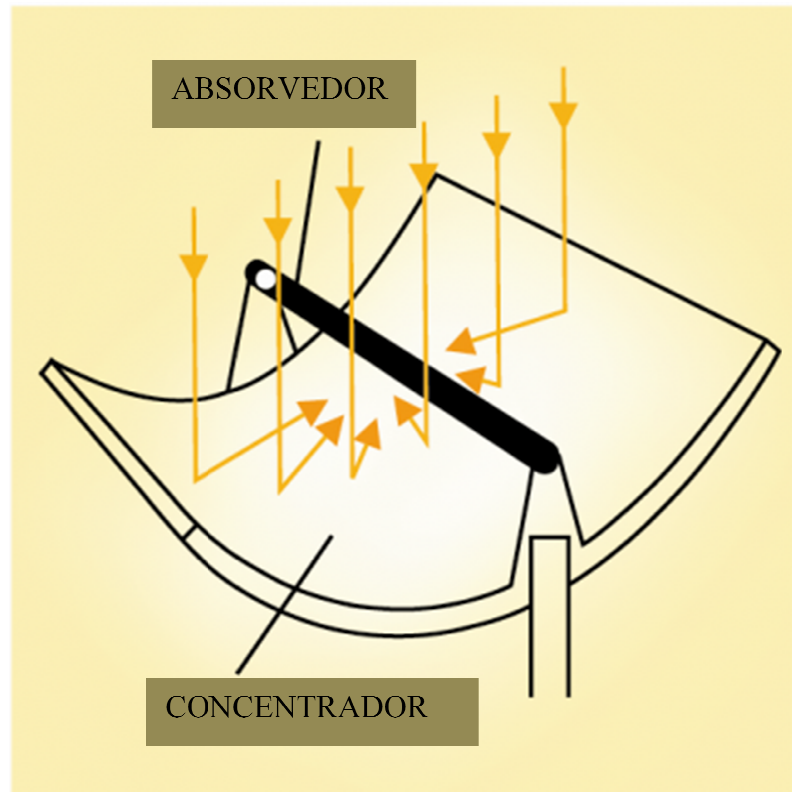


Figura 3 - Curva de rendimento de típica de alguns colectores e aplicações

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Para elevadas temperaturas de serviço, temperaturas superiores a 200°C, é usual usar-se colectores com concentradores. Deste modo, concentra-se a radiação, obtendo-se uma área de perdas para o exterior pequena, por outro lado a área de radiação absorvida continua a ser grande, porque esta é referida à área do concentrador. Os concentradores parabólicos são um tipo de concentradores que se regem por este princípio; utilizam uma parábola para concentrar a energia solar num só ponto (concentrador), o Foco. Nesse ponto é colocado um tubo onde circula o fluido a aquecer, o absorvedor. Como se atingem elevadas temperaturas de aquecimento, é normalmente utilizado como fluido de trabalho um óleo térmico. [6]



r

Uma característica fundamental deste tipo de colectores é a razão de concentração. Esta indica-nos a relação entre a área de abertura, isto é, entre a área de colector que recebe radiação solar e a área de absorção, por outras palavras a área do tubo onde circula o fluido. Teoricamente, quanto maior a razão de concentração, melhor é o rendimento do colector. Na prática, verifica-se que não é fácil trabalhar com razões de concentração muito elevadas, pelo que tem que existir uma solução de compromisso. Normalmente para este tipo de colectores registam-se razões de concentração em torno de 50.



Figura 5 - Razão de concentração

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Apesar deste tipo de colectores ter a vantagem de apresentar temperaturas de serviço bastante elevadas – pode chegar-se a temperaturas de 400 °C – a verdade é que também apresenta desvantagens.

Uma desvantagem é o facto de a baixa temperatura de serviço, dentro dos limites de um colector plano, não apresentar um rendimento mais elevado que este último.

Porém, a real desvantagem deste colector está associada ao facto de não funcionar com radiação difusa. Como sabemos, existem dois tipos principais de radiação solar, a radiação directa que vem directamente do sol tendo por isso direcção e a radiação difusa, que é aquela que de uma maneira geral não apresenta direcção. Como veremos mais adiante, este tipo de colectores não funciona com este tipo de radiação, pelo que em dias onde o céu não esteja limpo (dias onde a fracção de radiação solar directa é menor face à radiação total) o rendimento do equipamento é drasticamente comprometido.

Como as temperaturas de serviço destes colectores são muito elevadas existem aplicações para estes colectores que os colectores convencionais não têm. Assim de uma maneira geral, estes colectores têm como aplicações:

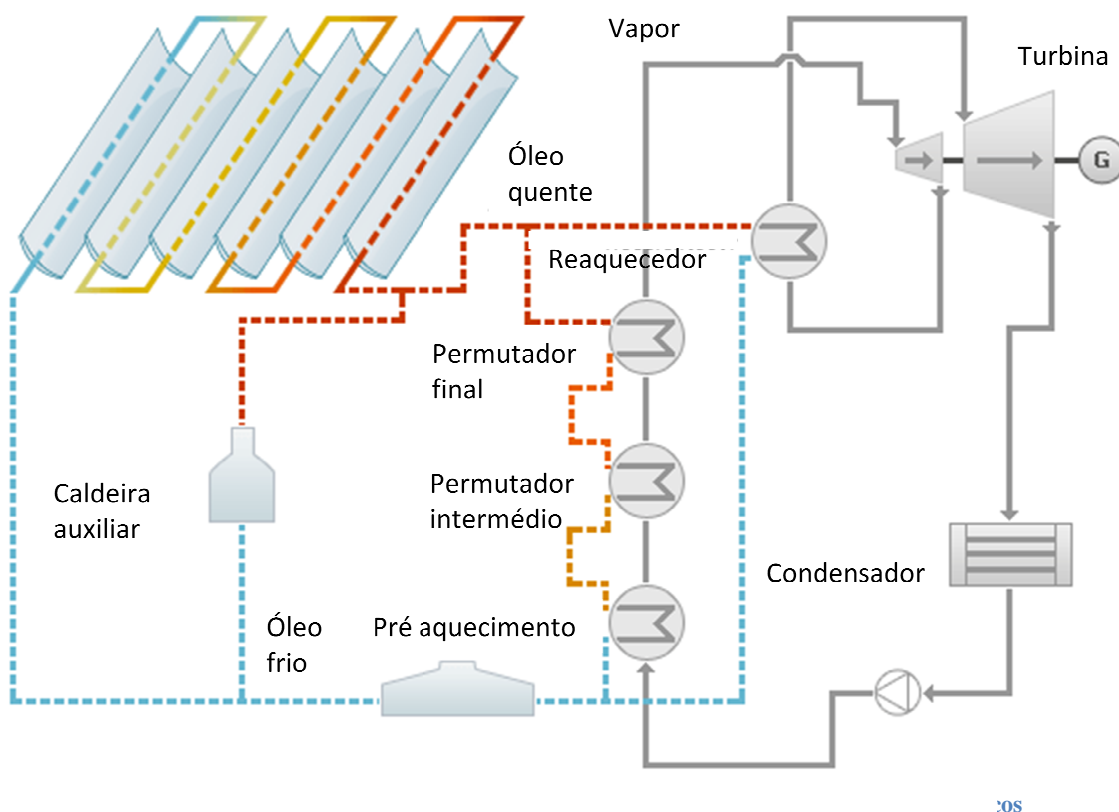
- Aquecimento de águas para altas temperaturas (80 até 100 °C), substituindo as caldeiras convencionais ou esquentadores. Deste modo contribui-se para uma diminuição da dependência dos combustíveis fósseis e redução das emissões de efeito de estufa. Para além disso a factura a pagar para ter água a essa temperatura desce consideravelmente.
- Produção de vapor para a indústria. Na indústria é muito vulgar usar-se vapor de água a baixa temperatura (em torno de 120 a 150°C) para a produção, pelo que tal como na aplicação anterior se pode diminuir a poluição, a dependência dos combustíveis fósseis e as despesas.



Figura 6 - Utilização de vapor de água na indústria



- Produção de energia eléctrica através do uso de um ciclo de Rankine onde a caldeira é substituída pelo colector. Como a temperatura de evaporação é menos elevada que num ciclo de Rankine convencional (cerca de 250/300°C, quando a convencional anda em torno dos 600°C) não é usual usar-se vapor de água, mas sim outro tipo de fluidos. Desta forma contribui-se para uma maior independência dos combustíveis fósseis. Já existem grandes parques de colectores solares nos E.U.A. e no Egipto que produzem grandes quantidades de energia.



### 1.3 Estudo e desenvolvimento do protótipo do concentrador parabólico

Como já foi referido, já existia um protótipo do projecto existente. O protótipo apresentava-se ainda pouco desenvolvido em alguns aspectos, embora noutros já apresentasse um desenvolvimento razoável. Por exemplo, o material usado no concentrador era uma chapa de aço inox brilhante, que apresenta um índice de reflexão abaixo de 80%, por outro lado, já apresentava um perseguidor do sol (sistema de tracking) bastante desenvolvido.

À partida o material do concentrador não era o mais indicado, porque apresenta uma reflectividade relativamente baixa. O absorvedor era constituído por uma placa de alumínio com dois tubos dobrada a 90° e isolamento na parte superior, de acordo com a figura 8. A área de absorção é relativamente elevada em relação à área reflectora, pelo que, um dos problemas de funcionamento pode estar neste facto.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

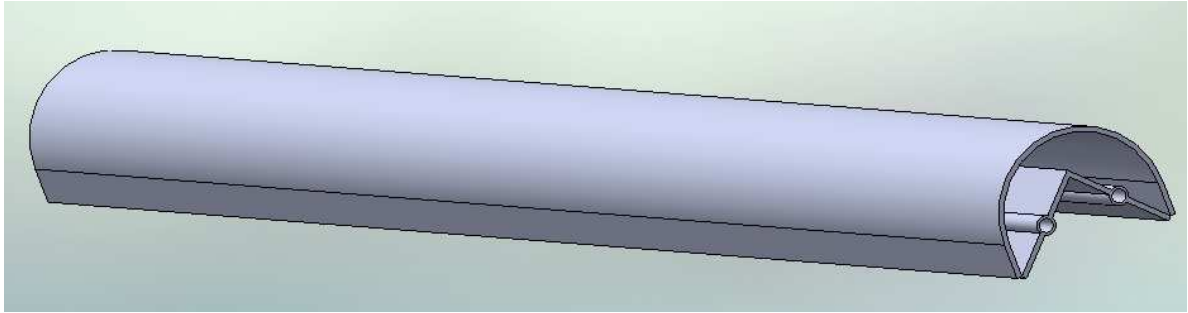


Figura 8 - Absorvedor original

A estrutura de suporte ao concentrador e absorvedor é constituída por chapas do tipo sanduíche, alumínio-plástico-alumínio. Toda esta estrutura estava assente noutra de aço, onde para ser possível existir um acompanhamento do sol existem dois eixos de rotação, um que roda o concentrador no eixo XY, responsável por manter o azimute do colector relativamente ao sol igual a zero, isto é acompanhar a azimute do sol ao longo do dia; o outro eixo permite ao concentrador mudar a sua inclinação na vertical, acompanhando a variação da altura do sol ao longo do dia.

Para fazer o acompanhamento do sol são utilizados quatro sensores, que lêem a quantidade de sol que recebem. Tratam-se basicamente de quatro células fotovoltaicas. As células estão colocadas em forma de cruz, de acordo com o que se pode ver na figura 8. Para regular o azimute o controlo lê a energia que o sensor X e Y absorvem, e roda no sentido do sensor que apresentar maior energia eléctrica de tal modo a que as energias se equilibrem novamente. O mesmo acontece com o controlo da altura só que desta feita com os sensores Z e W.

Como já mencionado anteriormente, para este trabalho, o objectivo principal é colocar em funcionamento este protótipo. Depois de percebidos os principais problemas do protótipo, então, é necessário quantificar o rendimento do mesmo e incrementa-lo.





## 2. Fundamentos teóricos

Os colectores solares apesar de apresentarem uma grande simplicidade no conceito, apresentam uma base teórica muito alargada, sendo importante conhecer bem os fundamentos teóricos para que o resultado final seja o desejado.

Os colectores com concentradores, o caso aqui estudado, apresentam ainda mais fundamentos teóricos devido a serem tecnologicamente mais complexos que um colector convencional, e por ainda não existirem muitas empresas a optar por esta solução para aproveitamento solar para aquecimento.

Num concentrador parabólico existem dois componentes fundamentais à conversão da energia solar em energia térmica, o absorvedor e o concentrado. A sua boa conjugação é fundamental, por isso começemos por abordar com mais detalhe a questão relacionada com o foco.

Ainda nesta vertente teórica serão abordadas possíveis aplicações deste tipo de equipamento, assim como um custo provável do mesmo.

### 2.1. Foco do concentrador

O foco de uma parábola resulta do facto de a radiação solar reflectida no concentrador parabólico com um ângulo igual ao de incidência concentrar-se teoricamente num único ponto, isto é, considerando que a superfície de concentração tem um comportamento de superfície especular, um espelho perfeito. Este fenómeno é exclusivamente geométrico. Outra situação estudada foi a utilização dum concentrador cilíndrico, só que neste caso temos uma linha de foco e não um único ponto. Ambas vão ser estudadas, uma vez que a parábola foi a solução encontrada, a solução final e ainda por cima a solução mais usada no mercado. Por outro lado, a circunferência, foi a determinada altura do estágio uma solução estudada.

A concavidade mais usada para este tipo de concentradores solares (inclusive o protótipo existente) é a parábola, por isso mesmo será a primeira a ser estudada, e à qual será dedicado mais tempo de estudo visto que a solução final também utiliza esta geometria.

#### 2.1.1. Parábola

Matematicamente, uma parábola é definida pela expressão:

$$Y = a * X^2 + b * X + c$$

Porém, a parábola apresentada tinha uma equação mais simples, tendo em conta que era simétrica e o referencial adoptado coincidia com o vértice da mesma. O mais importante para estas soluções é o coeficiente  $a$ , que define a abertura do concentrador. Tal como já foi referido, um valor elevado de  $a$ , conduz-nos a uma parábola bastante fechada; existe o problema de ser mais difícil de conceber (apesar das chapas usadas são normalmente de espessura reduzida) e de custos mais elevados, visto que, como já foi referido, para uma mesma área de abertura é usado mais material reflector. Porém o erro cometido traduz-se numa perda de rendimento do colector mais reduzida.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

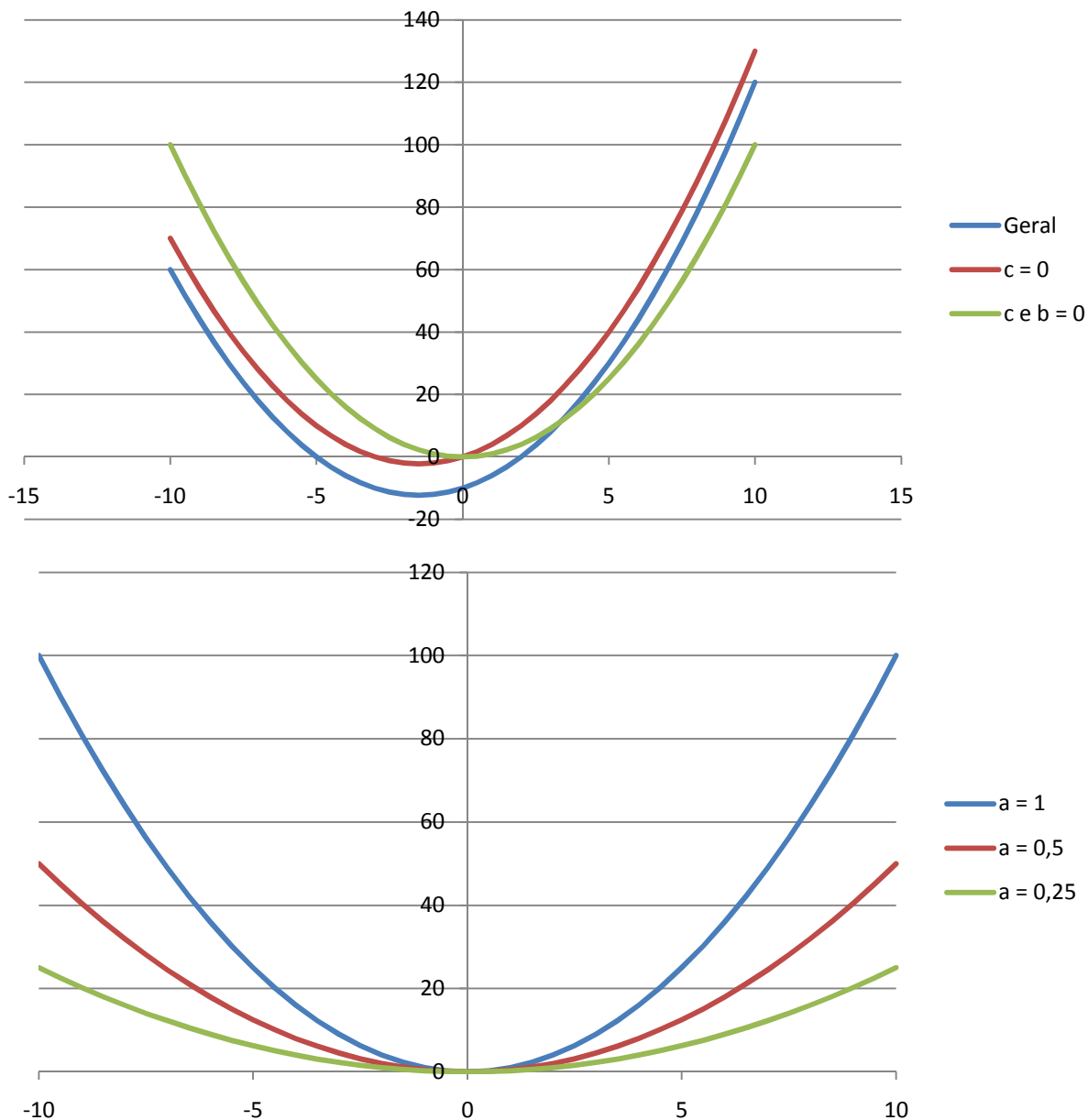


Figura 9 - Curvas de algumas parábolas

A lei da reflexão diz-nos que a radiação é reflectida com o mesmo ângulo que a radiação faz com a normal à superfície reflectora, como podemos verificar pela figura 10. Nesse caso  $\theta_i$  é igual a  $\theta_r$ . [7]

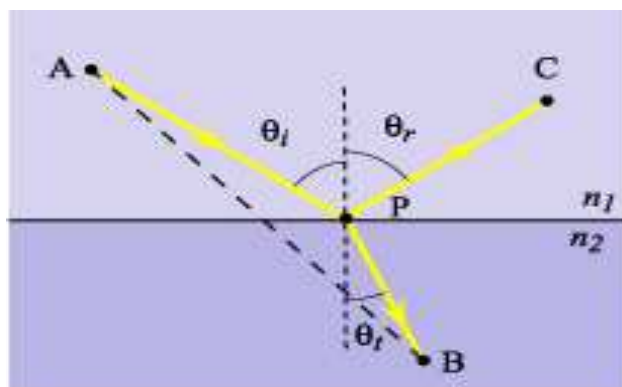


Figura 10 - Caracterização da reflexão e refração

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

É, então, necessário conhecer a normal ao ponto de incidência na superfície para se saber o ângulo de reflexão.

A matemática define que a derivada num ponto de uma parábola nos dá a recta tangente à mesma nesse ponto, ou seja, a normal à parábola num determinado ponto é perpendicular à derivada da mesma nesse ponto.

Tendo uma parábola definida por:

$$(x; y) = (x; a * x^2)$$

A derivada em qualquer ponto será então dada por:

$$(x; y') = (x; 2a * x)$$

Da mesma forma, a normal à curva será dada:

$$(y'; x) = (2a * x; x)$$

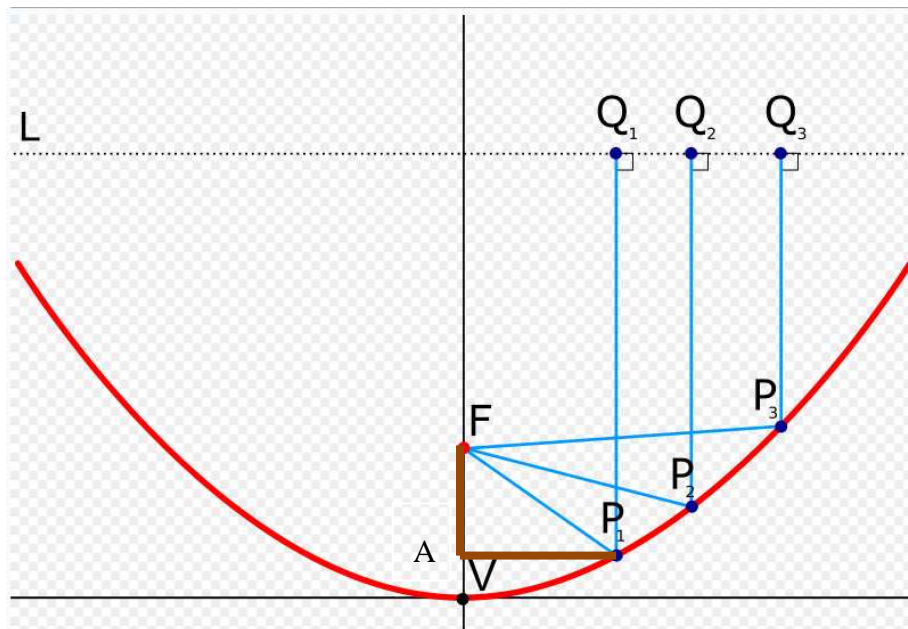


Figura 11 - Foco numa parábola

Analisando a figura 11, sabe-se que o comprimento do segmento de recta que liga F a P pode ser calculado através do teorema de Pitágoras.

Sabendo que:

$$\overline{AP} = x \quad \overline{VF} = f \quad \overline{AF} = x - y = x - a * x^2$$

Então:

$$\overline{FP} = \sqrt{x^2 + (f - y)^2}$$

Sabendo, também, que a distância entre F e P é igual à distância entre F e Q para Q abaixo da parábola como representa a figura 11.

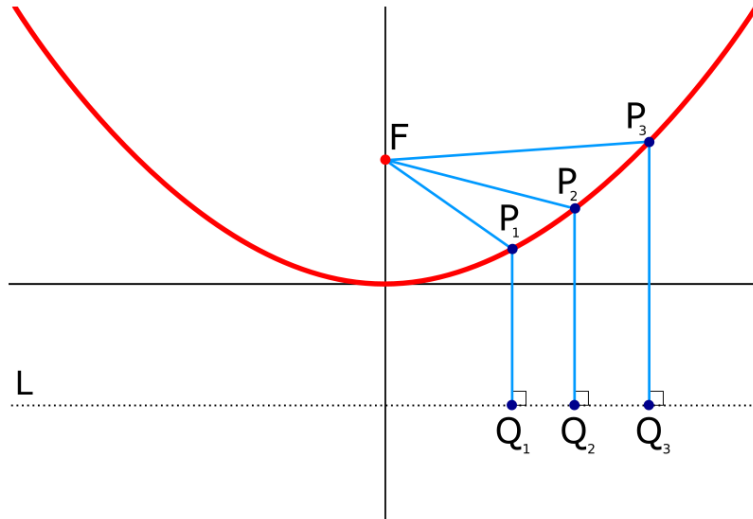


Figura 12 - Cálculo do foco da parábola

$$\overline{QP} = f + y$$

Para calcular o foco tem de se igual a distância entre Q e P e F e P, então:

$$f + y = \sqrt{x^2 + (f - y)^2}$$

$$f + ax^2 = \sqrt{x^2 + (f - ax^2)^2}$$

$$f^2 + 2f ax^2 + a^2 x^4 = x^2 + f^2 - 2f ax^2 + a^2 x^4$$

$$x^2 = 4f ax^2$$

$$1 = 4fa$$

Ou seja:

$$f = 1/4a$$

### 2.1.2. Cilindro

A circunferência, tal como a parábola, foi uma solução estudada para o concentrador. Por isso, será neste trabalho feito o seu estudo, porque apesar de o protótipo existente não apresentar um concentrador com o perfil de uma circunferência, e de a ideia principal ser construir um concentrador com perfil de uma parábola, a verdade é que várias vezes se abordou o assunto de concentrador em forma de cilindro.

A circunferência é caracterizada matematicamente da seguinte forma:

$$x^2 + y^2 = r^2$$

Ou:

$$y = \sqrt{r^2 - x^2}$$

Como já foi referido, na circunferência não existe um único ponto de foco mas sim uma linha focal. Desta forma torna-se impossível prever essa linha, visto que essa varia de acordo com o perfil da circunferência. Como a radiação solar se concentra numa linha focal, o que acontece é que a razão de concentração nunca é muito grande, porque se já na parábola é impossível obter a concentração num único ponto porque existem erros na construção, então,

o resultado final será ainda pior quando se parte de uma solução onde teoricamente já não existe foco pontual.

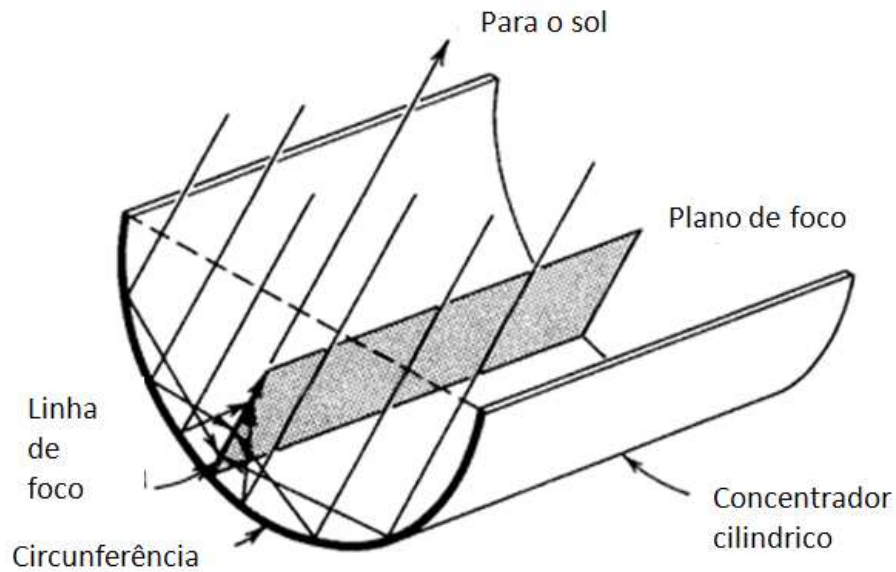


Figura 13 - Estudo foco de circunferência

## 2.2. Breve descrição dos conceitos de transferência de calor

Para se entender melhor o trabalho que foi realizado é necessário entender os fenômenos como:

- Transferência de calor:
  - Condução

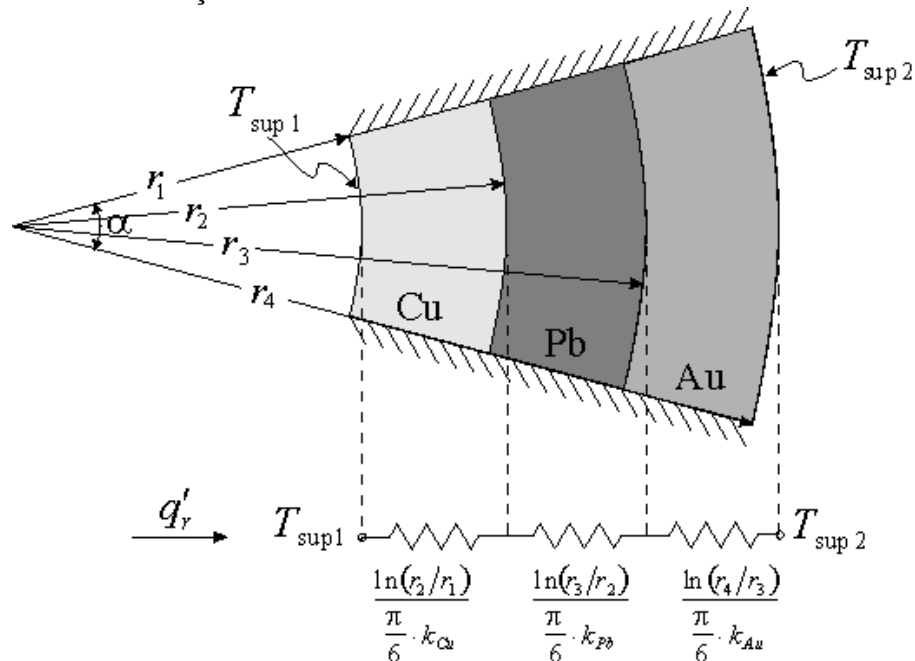


Figura 14 - Condução em cilindros

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

### ○ Convecção

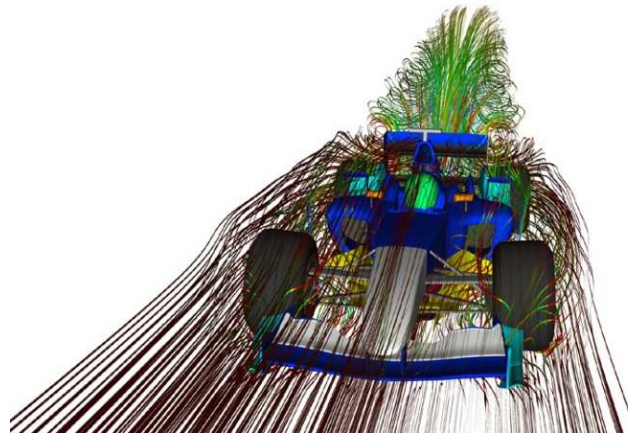


Figura 15 - Convecção forçada

### ○ Radiação

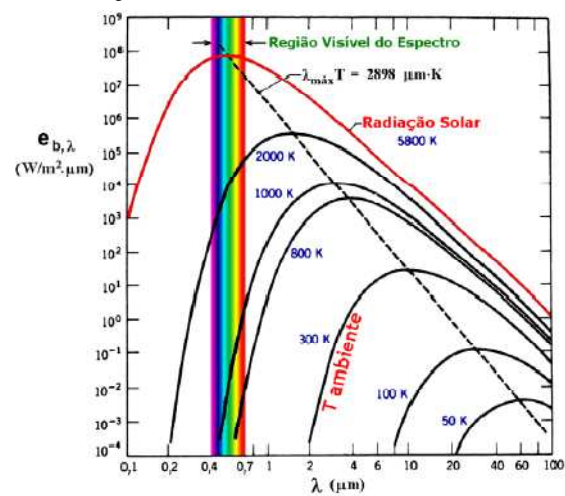


Figura 16 - Lei de Planck

- Emissividade de uma superfície
- Absorção de uma superfície
- Transmissão de um corpo
- Reflexão de uma superfície

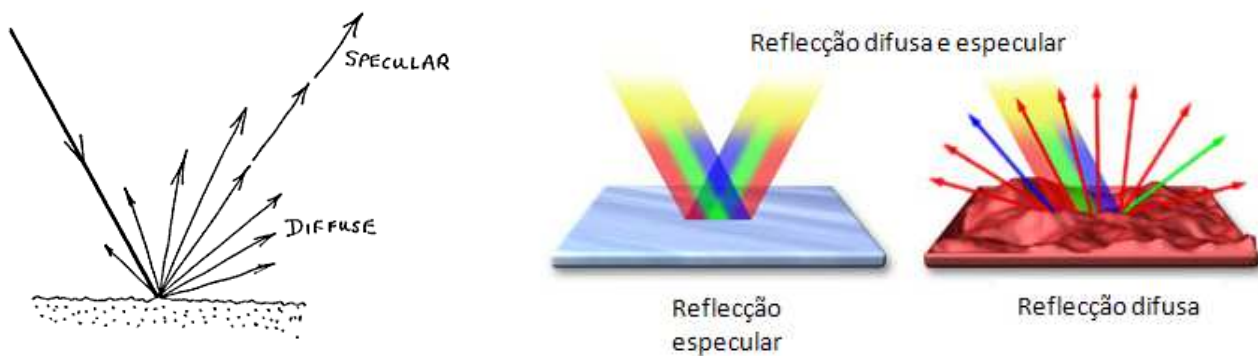


Figura 17 - Reflexão

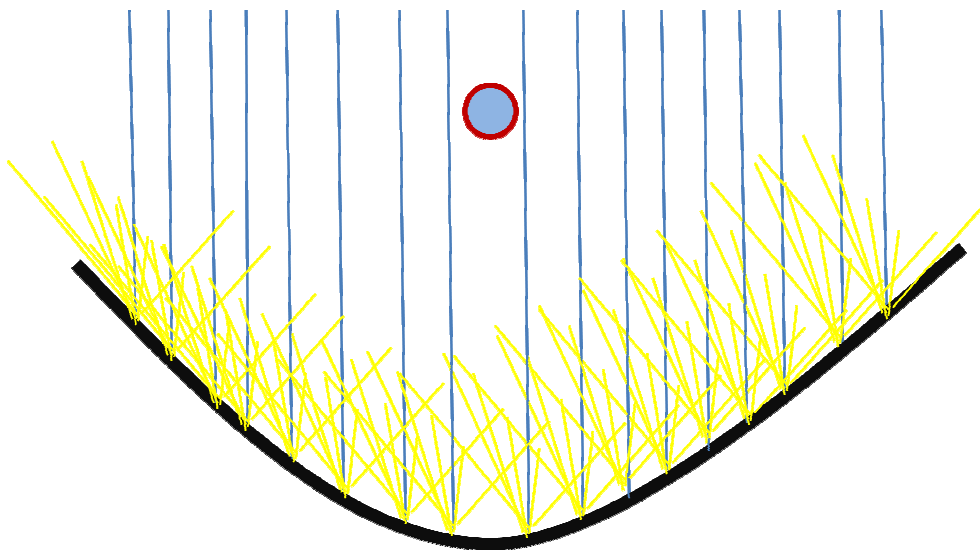
### 2.3. Concentrador

Como já foi narrado, um dos elementos principais do colector com concentrador é o próprio concentrador. Neste capítulo será estudado o concentrador na questão dos materiais e suas propriedades, visto que a questão da geometria da concentração já foi abordada no anterior capítulo.

Para o concentrador é essencial que a reflectividade seja alta, porque se a radiação passar pelo corpo (como no vidro) não vai ser direccionada para o absorvedor. Poderia pensar-se que se o corpo fosse um bom absorvedor, também resultaria, porque a radiação absorvida, se o corpo fosse adiabático, isto é, perfeitamente isolado, seria toda emitida, porém, tal não é verdade, porque:

- Não é possível que o concentrador seja um corpo adiabático; existem sempre perdas para o exterior;
- Por não poder ser adiabático o que acontece é que a energia cedida ao exterior contribui para a queda de rendimento do colector;
- A temperatura do concentrador nunca seria igual à temperatura equivalente da radiação solar, poderia implicar que a radiação emitida pode ser infravermelha e o vidro por exemplo é opaco à radiação com esse comprimento de onda;
- É errado pensar que por a radiação reflectida especular concentrar no foco, a radiação emitida será também ela concentrada no foco. Na verdade tal não acontece, visto que a radiação emitida é difusa, ou seja, é emitida em qualquer direcção

Para além do concentrador dever ser uma superfície com boa reflectividade, deve ter também reflectividade especular, porque de outra forma a questão abordada no anterior subcapítulo da concentração não se verifica, uma vez que esta é baseada no princípio de que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência.



usa

Normalmente, é usado o alumínio polido para construir o concentrador, porque para além de ser fácil de moldar (para construir a parábola) pode atingir índices de reflexão total de cerca de 96%. Neste caso, 90% da radiação é reflectida de forma especular, sendo que só cerca de 6 % é reflectida difusa. A restante radiação é absorvida. Mais adiante, na parte prática será feito um estudo com base em catálogos de alguns fornecedores, nomeadamente da Alanod.

Face ao aço inoxidável brilhante o alumínio apresenta a vantagem de ter um maior índice de reflexão, porém é também mais susceptível a riscos.

### **2.4. Absorvedor**

Outro dos componentes fundamentais do colector é o absorvedor. A missão deste componente é transmitir a maior quantidade de energia solar possível ao fluído. Para além disso, deve ser construído de tal forma que também minimize a quantidade de energia que perde para o exterior porque se encontra a uma temperatura superior à temperatura do ambiente. Analisemos, agora, as soluções presentes no mercado assim como soluções adoptadas neste trabalho e os fundamentos teóricos em que assentam.

#### **2.4.1. Tubos de vácuo**

Uma das soluções mais vulgares para o absorvedor no mercado é usar-se tubos de vácuo. Desta forma conseguem-se perdas para o exterior no absorvedor bastante baixas e o índice de energia absorvida continua bastante elevado. Esta solução apresenta como grande contra o seu elevado custo. O princípio de tubo baseia-se no facto de que na ausência de matéria, não se verifica transferência de calor por condução ou convecção.

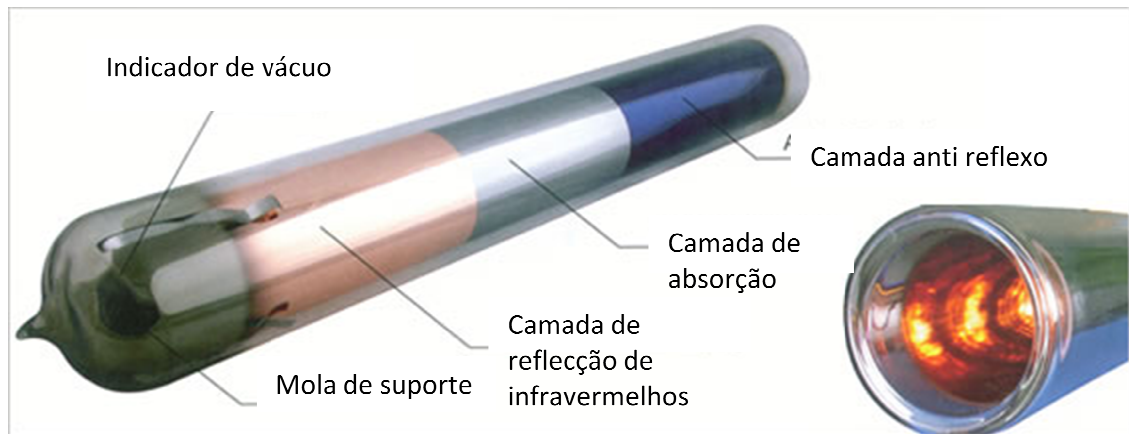
Existem vários tipos de tubo de vácuo existente no mercado, mas as soluções dividem-se, essencialmente, nos que usam dois vidros concêntricos para fazer vácuo e nos que usam apenas um.

No primeiro caso, o que existe são dois tubos concêntricos, e entre os dois é feito vácuo, ou melhor, é feita uma depressão, tendo em conta que vácuo é conceito teórico inexistente na superfície terrestre, pressupondo-se total ausência de matéria.

O tubo de vidro do interior é normalmente revestido com um tratamento que confere à superfície um coeficiente de absorção bastante elevado e um coeficiente de emissão muito baixo. No interior deste é colocado, normalmente, um tubo de cobre onde irá circular o fluído a aquecer. Soldado a este está uma lamela de cobre com superfície selectiva (alta absorção baixa emissão), sendo então enrolada e inserida no interior do tubo do interior.

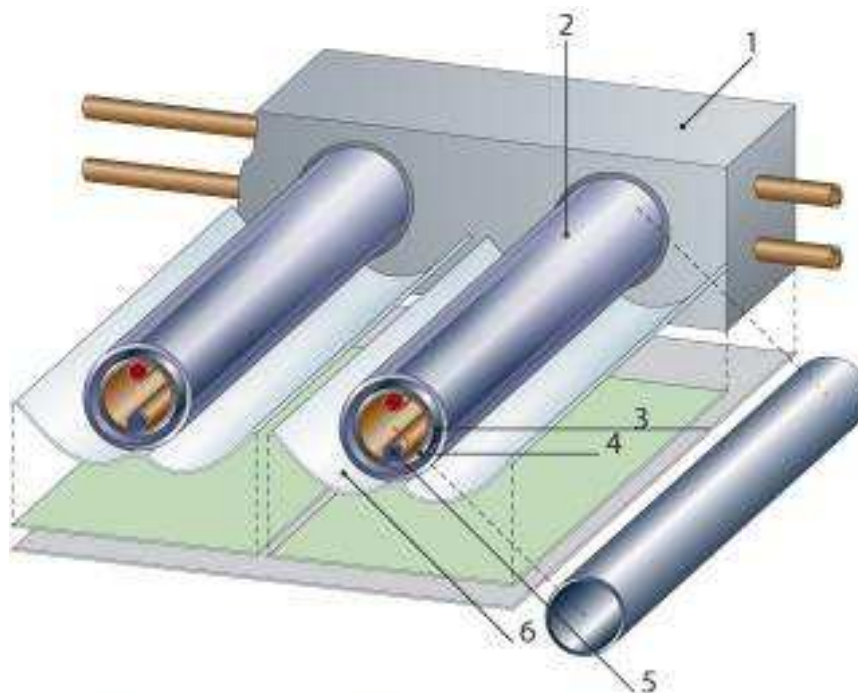


## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico



5

Dentro desta solução existem outras vertentes, como alguns que apresentam não um mas sim dois tubos de cobre onde circula o fluido, solução onde não existe fluido auxiliar, como os tubos de calor.



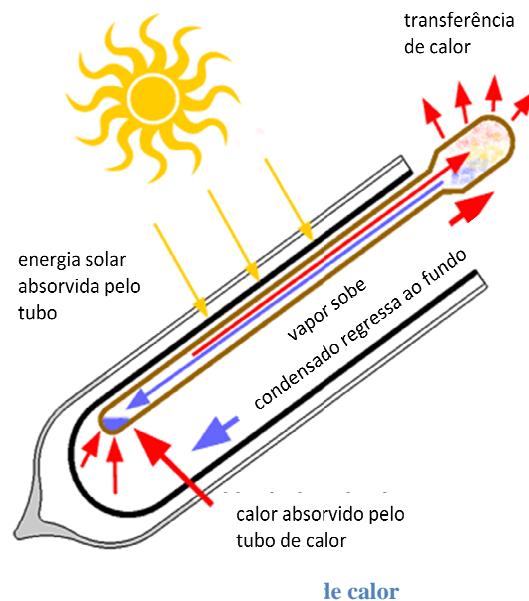
Esta solução tem como desvantagem principal possuir dois vidros, o que diminui consideravelmente o rendimento óptico do colector, na medida em que a transmissibilidade é menor, devido a ter de passar em dois vidros e não num único. A relação entre área de abertura e área de absorção é também ela maior, contribuindo também para que para uma mesma área de abertura, o rendimento seja menor.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

A grande vantagem é que a depressão é bastante elevada, mesmo podendo ser usado o absorvedor que for conveniente. Desta forma é possível ter uma solução sem fluido auxiliar, ao contrário dos outros tubos de calor. Ou seja, de uma forma geral, existe uma maior liberdade para projecto do colector.



Outra solução passa por utilizar apenas um tubo e fazer vácuo dentro deste. Posteriormente, é introduzido um tubo de cobre plano, com uma superfície selectiva, por vezes por contacto (pior) outras com recurso a soldadura (melhor opção). Neste caso, o rendimento óptico será menos afectado, tendo em conta que a área de absorção é maior e apenas temos um vidro. Nesta solução é usado um fluido auxiliar. O tubo é colocado inclinado onde o fluido auxiliar transfere calor como se de um tubo de calor se tratasse. Ou seja, o fluido é aquecido no tubo de vácuo e vaporiza, sobe e no topo tem condensa, transferindo calor para a água. Condensando, volta a descer e recomeça o ciclo, ou seja, é difícil de colocar na parábola porque a parte inferior é fechada. [8]



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico



Figura 23 - Tubo de vácuo

Ambas as soluções para os tubos de vácuo não eliminam o seu principal handicap, isto é, o preço. De facto um bom tubo de vácuo custa bastante, o que no colector apresentado pode significar mais de 50% do preço de fabrico.

Uma questão que se pode levantar nesta última solução é a estanquicidade. Mas embora possa acontecer de com o tempo se perder o vácuo, tal é bastante difícil de acontecer. No caso da depressão se ter perdido, existe um marcador normalmente no local onde é feito o vácuo que permite saber, porque esta desaparece quando o vácuo deixa de existir.



Figura 24 - Indicador da presença de vácuo

#### 2.4.2. Tubo com vidro

Outra solução passa por usar um vidro de forma a minimizar as perdas para o exterior. Como será acrescentado mais adiante, esta foi uma das soluções adoptadas, pelo que se achou conveniente que no relatório estivesse bem descrita a teoria por trás desta solução.

A solução do tubo de vidro passa por utilizar um tubo de cobre concêntrico num tubo de vidro. Neste caso, as perdas para o exterior são minimizadas porque se cria uma zona de isolamento em ar, que como veremos mais adiante é relativamente eficaz. Para além disso, os custos desta tecnologia são muito mais baixos que o tubo de vácuo. Claro que para uma aplicação onde forem necessárias temperaturas de serviço mais elevadas (300 a 400 °C) o uso de tubos de vácuo será inevitável. Para este produto só cerca de 20% dos clientes necessitaram de temperaturas superiores a 150 °C, por isso esta solução é perfeitamente viável.



Figura 25 - Solução com tubo de vidro

O tubo onde circula a água é um tubo de cobre pintado de negro, enquanto o tubo de vidro é um tubo de vidro simples.

Começemos por analisar o tubo de vidro, seguindo a tendência até aqui apresentada, ou seja, colocando-nos na posição da radiação.

O tubo de vidro tem como missão deixar passar o máximo de radiação no sentido do exterior para o interior, e o mínimo de dentro para fora. De uma forma geral isso é conseguido, devido às características do vidro, que é transparente a grande parte – cerca de 90% - da radiação solar (essencialmente visível e alguma infra-vermelha), mas é opaco à radiação emitida pelo tubo de cobre (essencialmente infra-vermelha). Vejamos a curva de transmissibilidade de um vidro comum ao comprimento de onda de radiação incidente. [1]



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

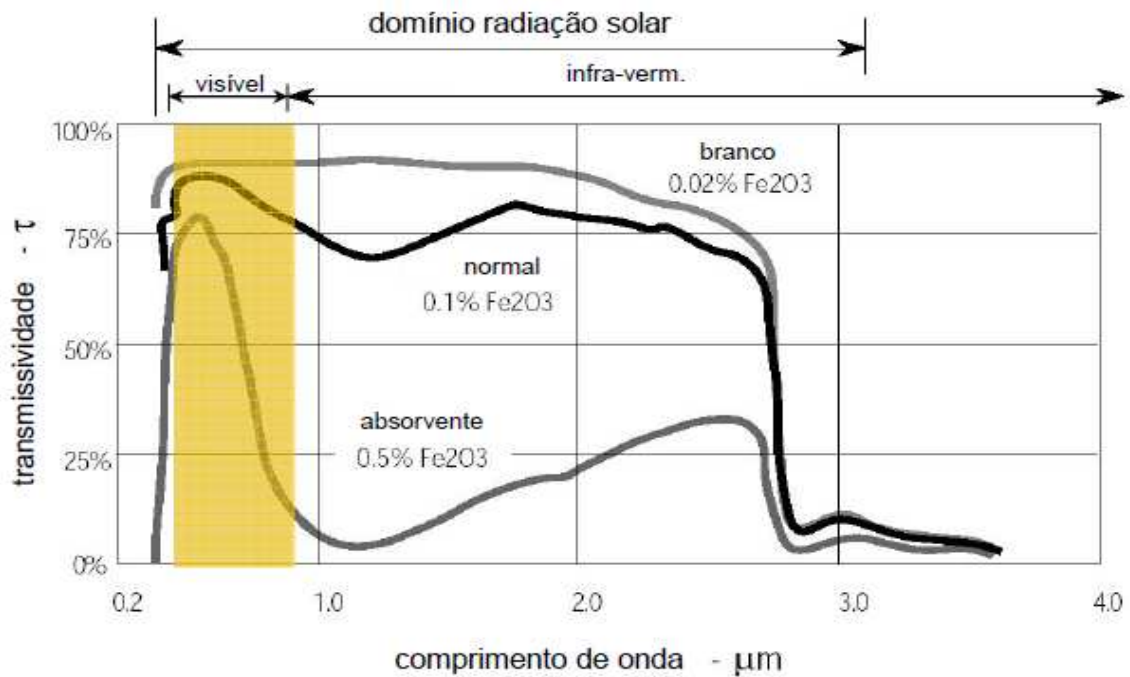


Figura 26 - Transmissibilidade de vários vidros

Como podemos verificar, o vidro comum tem uma transmissibilidade considerável da radiação solar, de uma maneira geral, superior a 85%. Se observarmos, a partir de um determinado valor de radiação (infra-vermelha), o vidro apresenta um índice de transmissibilidade muito baixo, sendo por isso que ocorre o fenômeno de efeito de estufa. O efeito de estufa é, normalmente, referido para temperaturas do tubo (de cobre) mais baixas que este caso, por isso é necessário analisar se existe esse efeito para o caso limite de termos o tubo a uma temperatura de cerca de 270°C.

Admitindo que o tubo de negro se encontra a uma temperatura de 270 °C, isto é, considerando a pior situação possível, a situação limite que são 250 °C no depósito (por isso a diferença para o tubo de 20 °C), verificamos que o comprimento de onda emitido pelo tubo (sendo este um corpo negro) se situa na região dos infra-vermelhos.

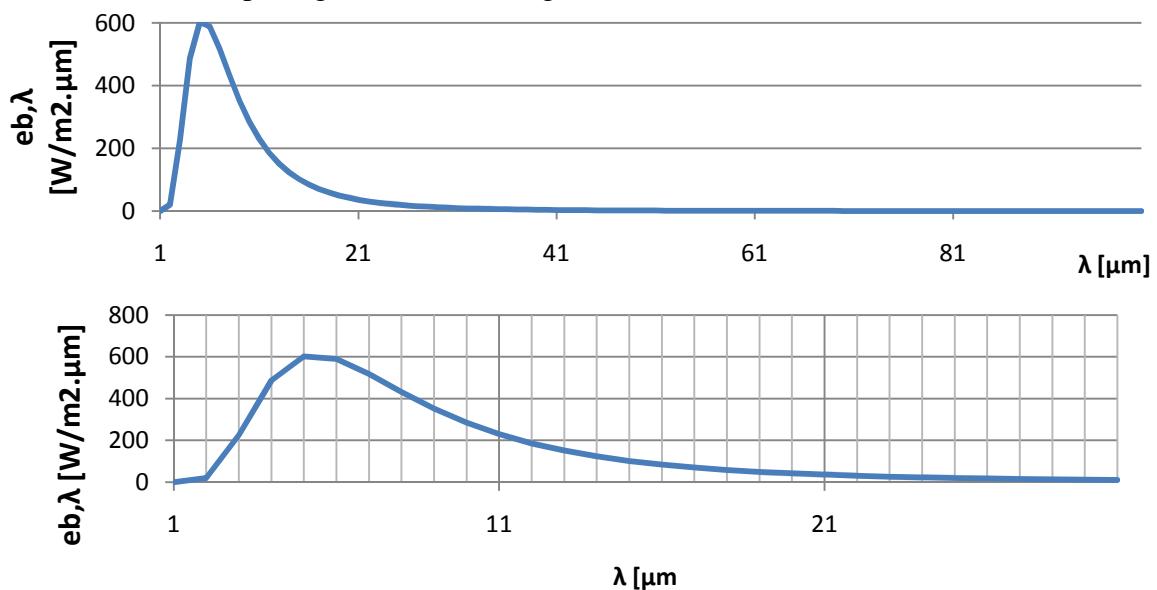


Figura 27 - Emissividade do tubo para temperatura de 270°C

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Como podemos verificar na figura 26 e cruzando com os dados da figura 27, chegamos à conclusão que o vidro é opaco à maior parte da radiação emitida pelo tubo, considerando que este é um corpo negro. Isto acontece porque o vidro tem uma transmissibilidade baixa a partir de comprimentos de onda superiores a  $3\mu\text{m}$ , ou seja, torna-se opaco; por outro lado, verifica-se pela figura 27 que para comprimentos de onda inferiores a  $3\mu\text{m}$  a radiação emitida pelo tubo é relativamente baixa.

Deste modo, o que acontece, é que a radiação que chega ao vidro vinda de dentro, isto é, emitida pelo vidro, não é transmitida ao exterior (como acontece à radiação solar) sendo então reflectida novamente para o tubo e contribuindo para o aquecimento do mesmo. Ou seja, verifica-se que o efeito de estufa, mesmo para temperaturas de  $270^\circ\text{C}$  continua presente.

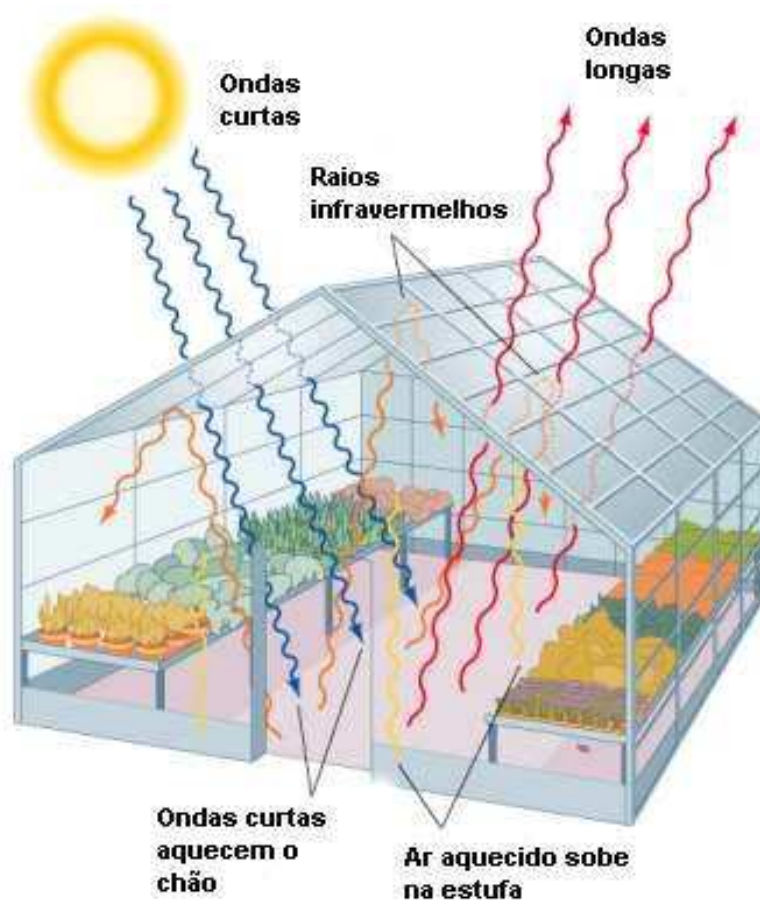


Figura 28 - Efeito de estufa

No mercado existem vidros específicos para provocar o efeito de estufa, como o vidro apresentado na figura 26, isto é vidros com baixo teor de ferro. Neste caso, o vidro tem uma transmissibilidade mais elevada para a luz solar, tornando-se depois opaco à radiação infravermelha. Este tipo de vidros é muito usado nos colectores porque desta forma aumenta-se o efeito de estufa e, consequentemente, o rendimento do mesmo, visto que existe um aproveitamento maior da radiação solar para o aquecimento da água.

Outra questão importante para o vidro tem a ver com a dependência da transmissibilidade com o ângulo de incidência da radiação. De facto, a transmissibilidade do vidro diminui à medida que o ângulo de incidência aumenta.

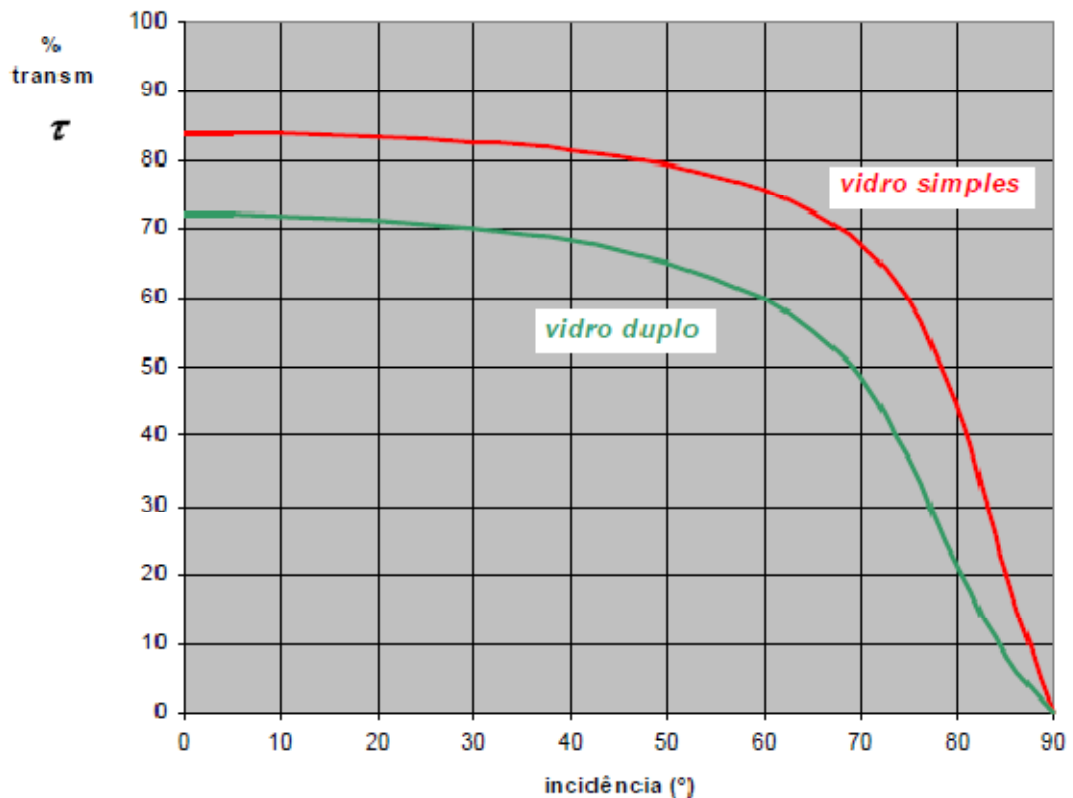


Figura 29 - Variação da transmissibilidade do vidro com o ângulo de incidência

Neste caso, como o vidro é um tubo o que acontece é que o ângulo de incidência varia ao longo do tubo, sendo assim, a transmissibilidade diminui desde o centro do tubo até à extremidade. Este factor tem de ser tido em linha de conta porque se atentarmos, a transmissibilidade a partir de 50° de incidência cai bastante. Aqui, é conveniente relacionar o ângulo de incidência com a forma da parábola. Se a parábola for mais fechada, é mais fácil de conseguir o foco no local certo, seguindo este raciocínio pode prever-se que desta forma o foco será mais no centro do tubo, e por isso, os ângulos de incidência serão mais baixos, aumentando a transmissibilidade global do vidro.

Outro elemento importante nesta solução é o tubo. O tubo é construído num material bom condutor e revestido a uma tinta ou selectivo que tenha preferencialmente uma absorção elevada e uma emissividade baixa.

A radiação que é transmitida pelo vidro chega à superfície do tubo onde circula o fluído a aquecer. Como o tubo não deixa a radiação ser transmitida, por outras palavras, não é transparente, a radiação que chega é absorvida ou então é reflectida. A radiação que é reflectida, não contribui para o aquecimento do tubo, pelo que, é benéfico que a absorção seja elevada e a reflectividade baixa. Porém, se considerarmos o tubo como um corpo cinzento, a emissividade é igual à absorção. Desta maneira o tubo recebe grande quantidade de energia, mas também emite bastante radiação para a vizinhança. Por isso, é conveniente que o material na superfície seja selectivo, isto é, absorva bem a radiação solar (para que a possa transmitir ao fluído) mas que emita o menos possível.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Para contrariar a adversidade de se ter uma emissividade elevada, foram desenvolvidas superfícies selectivas. Uma superfície selectiva é, como já foi referido, uma superfície que apresenta uma absorção e uma emissividade bastante diferentes, neste caso, era pretendida uma superfície que tivesse uma elevada absorção aos raios solares e uma emissividade baixa. Tal é possível porque a superfície apresenta um comportamento diferente de acordo com o comprimento de onda emitido/recebido, ou seja, de acordo com a temperatura de recepção e de absorção. [2]

A absorção como já foi referenciado, é dependente do comprimento de onda da radiação recebida. Desta maneira, como já sabemos que a radiação solar tem um comprimento de onda mais curto, devido à maior temperatura equivalente do que a radiação emitida pela superfície, o que se constrói é uma superfície que tem boa capacidade de absorção para radiação de curto comprimento e, consequentemente, alta emissividade para esse valor. Porém, o corpo não atinge uma temperatura tão elevada que emita comprimentos de onda tão curtos, desta forma, a absorção (e consequentemente a emissividade) é baixa para comprimentos de onda baixos.

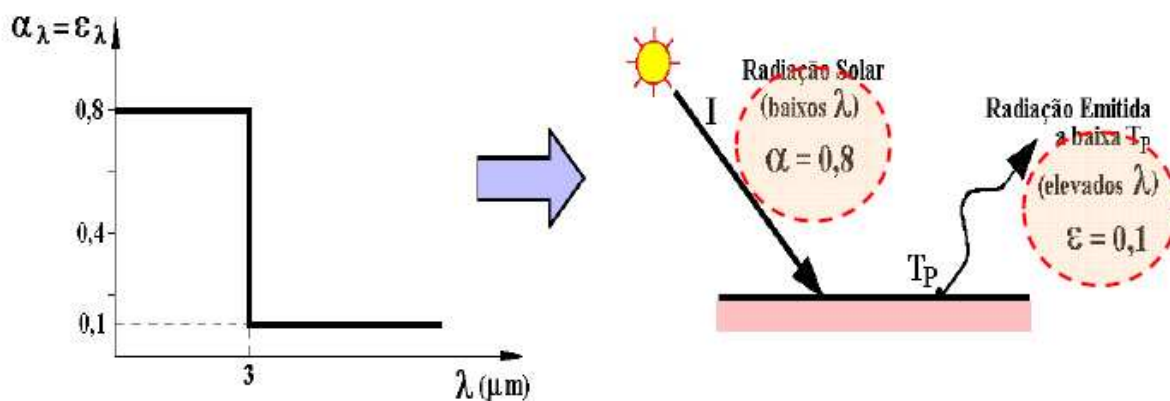


Figura 30 - Superfície selectiva

Normalmente estas superfícies selectivas são caras e de difícil implementação no caso de um tubo, sendo que geralmente são encontradas em finas chapas de alumínio ou cobre, revestidas com selectivo (lamelas). O selectivo é colocado fazendo vácuo e depois as partículas do selectivo são colocadas por processo de magneto-pulverização. Como já foi referido, o processo é aplicado a rolos de fina chapa, e é um processo contínuo, isto é, de um lado está a ser desenrolado um rolo de chapa sem revestimento, entra na máquina onde recebe o selectivo e depois é enrolado num outro rolo [5].



Figura 31 - Aplicação de selectivo



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Como é difícil de aplicar selectivo num tubo, o que é será mais indicado será aplicar uma camada de tinta selectiva. Neste caso, a tinta apresenta valores de emissividade elevados e absorção mais baixos que uma tinta normal, porém como usamos o vidro, o efeito de estufa contribui para que este inconveniente seja minimizado.

Caso não seja possível usar uma tinta selectiva, então devemos usar uma tinta negra para que pelo menos a radiação incidente no tubo não seja reflectida, mas seja absorvida, neste caso existirá uma grande quantidade de radiação emitida pelo tubo, mas como a radiação emitida não é transmitida pelo vidro, então o efeito é minimizado. Para altas temperaturas (270 °C) é imprescindível usar uma tinta selectiva.

Por outro lado, é conveniente salientar que tal como a transmissibilidade do vidro varia com o ângulo de incidência, este fenómeno também se verifica no caso da absorção da superfície de tubo. [7]

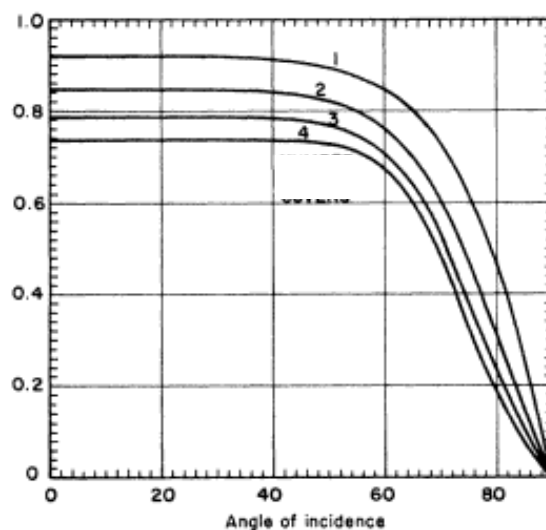


Figura 32 - Relação entre absorção e ângulo de incidência

O tubo deverá apresentar uma boa condutibilidade para que o calor absorvido pelo selectivo seja facilmente transmitido ao fluido, por isso o material usado costuma ser em cobre ou na pior das hipóteses alumínio, que tem uma condutibilidade menor mas apresenta um preço inferior.



Figura 33 - Tubos de cobre normalmente usados

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Para além disto, a transferência de calor por condução depende fortemente da espessura de parede do material, pelo que o tubo deve ter uma espessura que lhe dê resistência mecânica, mas que, por outro lado, seja o mais fino possível para que a transferência de calor seja mais elevada possível. [2]

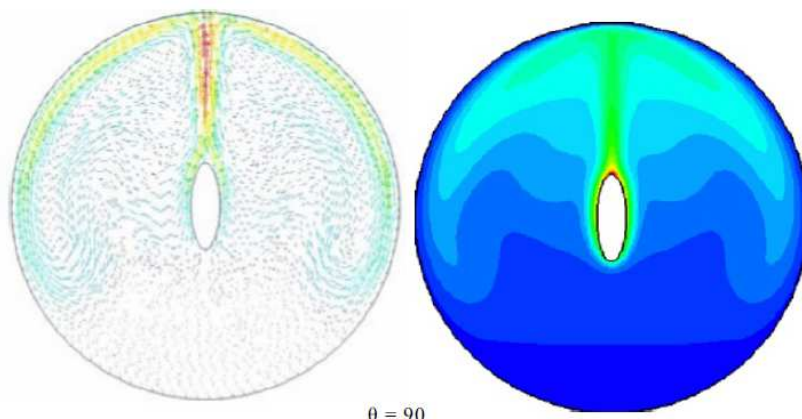


Figura 34 - Convecção entre um cilindro e um tubo achatado concêntricos

Por outro lado, e como já foi referido anteriormente, para além das características dos materiais (que já foram analisadas) existe um outro factor fundamental para que o comportamento seja o desejado. Trata-se da definição das medidas dos tubos (cobre e vidro) de forma a criar-se uma atmosfera de ar que tenha uma transferência de calor fraca.

Se analisarmos o que as referências bibliográficas dizem, reparamos que elas definem que a convecção existente entre os tubos é designada por convecção natural, que já foi analisada anteriormente, porém agora será feita uma análise para serem encontradas as correlações para a geometria em causa. [2]

Existem duas forças que condicionam o escoamento. Tal como no escoamento forçado, as forças de origem viscosa e que têm a ver com o facto de as partículas desenvolverem forças de atrito devido a um movimento relativo entre as mesmas; e forças de inércia referentes à inércia inerente das partículas a uma dada velocidade. Para relacionar estas duas forças usamos em convecção forçada o número de Reynolds, porém na convecção livre usa-se o número de Grashof. [2]

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

O número de Rayleigh relaciona o número de Grashof com a transferência de calor, através do número de Prandtl que nos dá uma correspondência entre a camada limite do escoamento e a camada limite térmica. [2]

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} * Pr$$

Agora para esta geometria, teria de ser analisado o comportamento num programa de CFD (Computational Fluid Dynamics) de forma a ser determinado o coeficiente de transferência de calor. Porém, como esta geometria é relativamente comum, foi elaborado por

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Raythby e Hollands um conjunto de correlações baseadas em resultados experimentais, tornando desta forma o processo muito mais simples. [2]

As correlações atribuem uma condutibilidade fictícia, considerando o efeito de condução e o efeito de convecção.

$$\frac{k_{eff}}{k} = 0,386 \left( \frac{Pr}{0,861 + Pr} \right)^{\frac{1}{4}} (Ra_c^*)^{\frac{1}{4}}$$

Onde:

$$Ra_c^* = \frac{[\ln(D_0/D_i)]^4}{L^3(D_i^{-3/5} + D_0^{-3/5})^5} Ra_L$$

Sendo que para:

$$Ra_c^* < 100$$

$$k_{eff} \approx k$$

Ou seja, para , deixa de existir convecção entre os tubos, estando então o ar estático, a transferência de calor dá-se por condução. Para um determinado fluxo, conclui-se fazendo uma análise das equações apresentadas que sabendo as temperaturas das superfícies e um dos raios dos círculos, existe um raio crítico a partir do qual começa a existir convecção.

Neste problema, a dimensão do tubo onde circula o fluido será feita de forma a maximizar a turbulência do fluido no interior do mesmo de maneira a aumentar a transferência de calor. Fica-se então dependente das temperaturas dos tubos, sendo que nesta situação, são elaboradas uma série de simulações para a temperatura do tubo crítica (270 °C para este caso) e uma temperatura do vidro considerada, chegando-se assim ao valor do raio crítico interior do tubo de vidro. O raio exterior, será dado pela espessura do vidro, que deve ser projectada de maneira a minimizar as perdas por convecção com uma transmissibilidade elevada.



cos

Como podemos ver pela figura 35, a transferência de calor tem um pico mínimo que coincide com o raio crítico, isto é, o raio limite para a partir do qual começa a existir convecção. Porém, e como podemos verificar, abaixo do raio crítico, uma pequena diminuição do raio provoca um aumento rápido da transferência de calor, enquanto que aumentando um pouco o raio, a transferência de calor não aumenta significativamente. Por isso é conveniente apostar num raio de tubo ligeiramente superior para não suceder o caso de estarmos abaixo do raio crítico, porque aí as perdas térmicas aumentam consideravelmente.

Existe ainda outro efeito que pode melhorar a performance da solução do tubo de vidro, que passa por efectuar uma depressão entre o tubo de vidro e o de cobre. Como é evidente, nunca se conseguirá chegar a uma depressão tão grande como num tubo de vácuo, mas a verdade é que se pode melhorar consideravelmente a performance desde equipamento com a compra de uma simples bomba de vácuo. Neste caso, é necessário assegurar a estanquidade do tubo, sendo que para isso é necessário o uso de vedantes bastante eficientes, o que se torna um problema.

Esta solução não foi usada, mas com mais estudo poderá vir a ser implementada, passando a solução do tubo de vidro a ser um intermédio entre o tubo de vidro simples e o tubo de vácuo.

### 2.4.3. Tubo com isolamento na parte superior

Outra solução estudada foi desenvolver um tubo de cobre onde a parte superior fosse isolada. Desta maneira consegue-se diminuir as perdas para o exterior pela parte superior. Por outro lado a área de abertura deixa de ser toda a área do concentrador, mas sim a área deste subtraída da área do absorvedor. Esta solução é explicada com maior detalhe no protótipo, pelo que nesta parte teórica é importante perceber como será feito o isolamento na parte superior, e os princípios inerentes a esse facto.

O material usado para se realizar o isolamento tem de ser um material que suporte altas temperaturas, porque este está em contacto com o tubo, por isso pode atingir temperaturas superiores a 250°C. O poliuretano ficou por isso fora de questão porque este material possui uma temperatura máxima de trabalho inferior ao solicitado, pouco mais de 100 °C.

Por isso o material a usar pode ser a lã de rocha, que apresenta uma condutibilidade menor que o poliuretano, mas por outro lado aguenta as temperaturas de trabalho solicitadas.

A ideia desta solução passa por isolar toda a superfície que não receba radiação proveniente do concentrador. Admitindo que o facto de concentração é por exemplo 40 (valor típico para este tipo de colectores) e se a radiação incidente for de 1000W/(m<sup>2</sup>K) então a radiação incidente proveniente do concentrador tem grosso modo 40000W/(m<sup>2</sup>K), enquanto que no restante tem os mesmos 1000W/(m<sup>2</sup>K). Com esta solução rejeitamos os 1000W/(m<sup>2</sup>K) porque o tubo a altas temperaturas tem perdas para o exterior bastante elevadas.

No subcapítulo anterior não foi estudado o fenómeno de condução porque a espessura do tubo de cobre é baixa e a condutibilidade é elevada, por isso pode considerar-se que o interior e o exterior do tubo de cobre estão à mesma temperatura. No protótipo essa parte será mais desenvolvida pois é importante para a construção da modelação.

## 2.5. Sistema de acompanhamento do sol (Tracking)

Para o sistema de acompanhamento do sol existiam duas soluções viáveis. Uma mais prática e que era o sistema usado, e uma mais teórica e difícil de implementar.

Teoricamente, podia ser feito sistema de acompanhamento tendo em conta as equações que nos dão a posição do sol em cada dia do ano. Para tal é necessário ter um relógio com boa precisão e garantir que este está acertado com a hora do país. É necessário também dar a orientação da parábola a determinada hora do dia. Ou seja, torna-se um processo complexo de realizar, que não envolve nenhuma (ou praticamente nenhuma) instrumentação, mas que por outro lado exige caracterizar correctamente o local, e instrumentos que garantam que as equações sejam válidas. Para além disso, existe sempre uma dose de incerteza nas equações que não é de todo desprezável, principalmente num colector que tolera um erro no ângulo de incidência muito baixo. Esta hipótese foi posta de parte, mas a verdade é que era a ideia inicial, antes mesmo de ser visto o protótipo, pois este podia não ter qualquer sistema de seguimento do sol.

De uma maneira geral é necessário relacionar a hora solar com a hora legal.

$$ET = 229,18(0,000075 + 0,001868 \cos(\gamma) - 0,032077 \sin(\gamma) - 0,014615 \cos(2\gamma) - 0,049849 \sin(2\gamma))$$

Onde:

$$\gamma = \frac{2\pi}{365}(d - 1) \quad d = \text{dia do ano}$$

Então:

$$\text{Tempo solar} = \text{Tempo legal} - \frac{\lambda}{15} - ET - 0/1$$

Onde  $\lambda$  representa a longitude do local, e 0 ou 1 é referente à hora de verão ou inverno.

Tendo depois o tempo solar e as coordenadas do local basta conhecer a posição do sol, por exemplo em coordenadas horizontais.

☺ **altura:**

$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos ah$$

com  $\phi$  – latitude

☺ **azimute:**

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin ah}{\cos h}$$

$$\delta = 0,3723 + 23,2567 \cdot \sin wu + 0,1149 \cdot \sin 2wu - 0,1712 \cdot \sin 3wu - 0,7580 \cdot \cos wu + 0,3656 \cdot \cos 2wu + 0,0201 \cdot \cos 3wu$$

com  $w = 360 / 365,2422$

$$u = d - 79,301 - 0,2422 \cdot (\text{ano} - 1969) + \text{INT}((\text{ano} - 1969) / 4)$$

em ° e c/ erro inferior a 0,02°

$$ah = 15 \cdot (TSV - 12)$$

Figura 36 - Equações para cálculo da posição do sol

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

A solução adoptada foi a de ter posicionamento do colector através da leitura da radiação solar com recurso a sensores, como já foi referido.

O esquema principal, como já foi apresentado, consiste em colocar um sensor a ler a radiação solar em cada sentido de movimento do grau de liberdade, ou seja, como tínhamos dois graus de liberdade com dois sentidos cada um, significa que tínhamos de ter quatro sensores.

Na realidade os sensores devem ler não a radiação solar mas sim a radiação solar directa. Como veremos mais adiante, os sensores instalados não tinham essa capacidade e tivemos problemas com esse facto.

Depois para fazer controlo da parábola é usado um PLC que amplifica o sinal dos sensores e dá ordem de accionamento do motor.

De referir que os sensores trabalham tanto melhor quanto mais longe estiverem um do outro.

Para se obter melhores resultados não se põem os sensores colocados a  $90^\circ$  na parábola, mas antes perto de  $180^\circ$  para que a variação do ângulo de incidência provoque uma grande variação na energia solar lida, aumentando por isso a sensibilidade do sistema.



Figura 37 - Sensores colocados a  $90^\circ$  e colocados a  $80^\circ$

De referir que o PLC possui uma afinação da amplificação dos sensores, pelo que também se podia regular o posicionamento do concentrador desta forma.

Importa referir que o posicionamento em relação à altura solar é o mais importante, visto que se o concentrador não estiver na perpendicular em relação à radiação solar, o foco deixa de ser no local onde está colocado o absorvedor, ou seja, o fluído deixa de receber calor.





Figura 39 - Imagem do foco fora do local

O posicionamento do azimute é também ele importante mas não exige uma exactidão tão grande, visto que o que está em causa é não ser aproveitado todo o comprimento do concentrador devido a efeitos de sombreamento.

De referir agora que como foram identificados problemas neste sistema, a descrição de como funcionam efectivamente os sensores será feita nessa altura, para que fique enquadrada com o problema reconhecido.



Figura 38 - Incorrecto posicionamento da parábola no azimute





### 3. Protótipo 1

Como já foi referido anteriormente, foi possível perceber da primeira vez que foi analisado o protótipo que a razão de concentração era bastante baixa. Desta forma, era evidente que o concentrador tinha uma área de perdas bastante elevada, pelo que o rendimento não podia ser alto como podemos aferir pelo anterior capítulo. Desta maneira, ficou decidido começar por modificar o absorvedor.

Como sabemos do anterior capítulo, a solução mais vulgar para absorvedor actualmente no mercado, é um tubo de vácuo, pelo que na primeira evolução pretendia-se passar de dois tubos para um único tubo.

Foram analisadas várias propostas. Numa delas, era colocado um tubo de cobre pintado de negro sem qualquer isolamento, nesta solução existia o problema do coeficiente global de perdas para o exterior ser relativamente elevado. O tubo era pintado de negro pelas razões apresentadas no capítulo anterior, ou seja, aumentava-se a absorção.

Outra solução passava por colocar isolamento na parte superior do tubo, isto é na parte inversa ao foco. Essa solução tinha a desvantagem de desperdiçar a radiação incidente directamente pelo sol, ao contrário da anterior. Desta forma, o rendimento global é incrementado para altas temperaturas, mas a baixas temperaturas, onde as perdas são menos importantes, o rendimento decresce. Fazendo uma modelação para uma incidência de vento na ordem dos 10 m/s. o coeficiente de perdas no absorvedor pela parte superior é cerca de  $100\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Admitindo que temos uma incidência de radiação solar de  $1000\text{ (W/m}^2\text{)}$ , e que o isolamento tem esconde uma área de radiação de cerca de  $100\text{mm}\times 2,5\text{m}$ , então, passa a ser benéfico utilizar isolamento a partir de uma diferença de temperatura entre a temperatura média do fluido e o exterior de  $45^\circ\text{C}$ . Ou seja, a partir de uma temperatura no depósito de  $50^\circ\text{C}$  (na pior das hipóteses) passa a ser benéfico utilizar o isolamento na parte superior. Como é lógico, esta não é contudo a melhor opção, visto a melhor opção será utilizar isolamento que não conduza a perdas de radiação absorvida, ou conduza a menores perdas.



Figura 40 - Desenho 3D e protótipo da primeira evolução

De seguida foi efectuada uma modelação no software EES, para haver um termo de comparação entre os resultados obtidos e os esperados pela modelação. Passar-se-á agora a apresentar as partes principais do programa de modelação criado.

### 3.1 Modelação no EES

A modelação é composta por duas partes principais. A parte referente ao colector (e mais importante para o caso) e a parte referente ao depósito.

Comecemos por falar do concentrador, que no fundo é o objecto de estudo.

#### 3.1.1. Descrição do absorvedor

No concentrador, a parte principal é o absorvedor. E neste caso é necessário estudar as equações que estão na base do programa criado. Para começar é necessário definir pontos do absorvedor. Estes serão os pontos principais e nos quais se baseará a modelação:

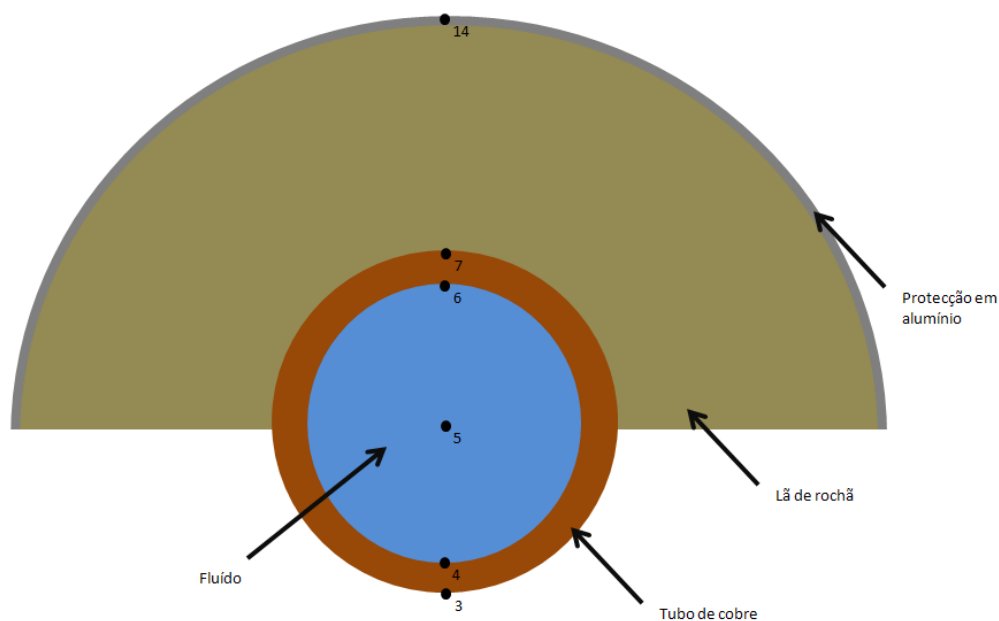


Figura 41 - Pontos do absorvedor na modelação no EES

Como podemos ver já por esta imagem, pode-se concluir que algumas simplificações foram levadas a cabo.

#### 3.1.2. Pontos da modelação a considerar no tubo do absorvedor

Neste trabalho só foram considerados inicialmente 4 pontos no tubo de cobre, dois na parte inferior e dois na parte superior. Mais adiante ainda será explicado que destes 4 apenas dois foram usados. Tal aconteceu porque, como o cobre tem uma elevada condutibilidade, a diferença de temperatura entre os pontos equivalente, neste caso, 3 e 7 por exemplo – admitindo condução ao longo do perímetro do tubo – é bastante baixa. Por este motivo, basta

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

considerar estes dois pontos, vai-se admitir que existe uma condução de calor entre os dois pontos equivalentes, ou seja a temperatura em 3 é diferente de em 7. Por outro lado vamos admitir que o ponto 3 representa um ponto na superfície inferior, isto é na superfície que recebe radiação solar, e que o ponto 7 representa um ponto na superfície isolado por lã de rocha.

Apesar de neste esquema estarem representados os pontos 4 e 6, a verdade é que para a modelação estes pontos estão à mesma temperatura de 3 e 7, respectivamente. Tal simplificação foi tomada, por duas razões:

- A espessura do tubo usado era muito baixa, cerca de 0,8mm, o que significa que a diferença de temperatura seria sempre tendencialmente baixa, mesmo que o material fosse um bom isolante, isto é, apresentasse uma condutibilidade térmica bastante reduzida;
- A condutibilidade térmica do cobre é muito elevada – é dos materiais com melhor (no sentido de maior) condutibilidade térmica, desta forma a diferença térmica nunca será muito elevada.

Mas façamos um exercício simples para tentar contabilizar os efeitos que esta simplificação pode ter. Admitamos então:

- Radiação solar = 1000 (W/(m<sup>2</sup>),
- Toda a radiação solar incide na área do absorvedor,
- Não existem perdas térmicas, ou seja toda a radiação incidente no ponto 3 vai para o fluído,
- A razão de concentração é 1200/22,
- Condutibilidade térmica do cobre de 400W/m

Então:

$$\dot{q} = 1000 * \frac{1200}{22}$$

E,

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{\Delta x} \Delta T$$

Logo,

$$1000 \frac{1200}{22} = \frac{400}{0,0008} \Delta T$$

Resultado:

$$\Delta T = 0,109 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Como podemos então verificar, não é necessário sobrecarregar o programa considerando as temperaturas diferentes em 3 e 4 diferentes porque na pior das hipóteses a diferença térmica será de 0,1°C, o que para o efeito pretendido, e para os meios de leitura de temperatura disponíveis é nitidamente pouco.

O mesmo raciocínio se pode aplicar no ponto 6 e 7, sendo que neste caso a situação ainda é mais favorável, tendo em conta que o calor transmitido será sempre menor que o considerado no exercício anterior.

### 3.1.3. Pontos da modelação a considerar no isolamento do absorvedor

O isolamento é feito com recurso a lã de rocha que depois recebe uma protecção em chapa de alumínio. Na modelação foi desprezado o efeito do alumínio, mais uma vez porque a espessura do mesmo não vai influenciar em nada a modelação.

Consideremos:

- Condutibilidade térmica da lã de rocha de  $0,035\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- Condutibilidade térmica do alumínio de  $235\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- Espessura da lã de rocha de  $40\text{mm}$
- Espessura do alumínio de  $1,5\text{mm}$

Sabendo que a resistência à condução é dada por:

$$R_{\text{cond}} = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

Então:

$$R_{\text{lã de rocha}} = 1.14 \text{ W}^{-1}$$

$$R_{\text{alumínio}} = 6.38 \times 10^{-6} \text{ W}^{-1}$$

Ou seja, a resistência à condução do alumínio é muito menor que a da lã de rocha. Por isso admitindo que se perde  $400 \times 1200 / 22 \text{ W/m}^2$ , o que é bastante, cerca de 40% do calor recebido (se for  $1000 \times 1200 / 22 \text{ W/m}^2$ ), pela parte superior. Então:

$$400 \frac{1200}{22} = \frac{235}{0,0015} \Delta T$$

Resultado:

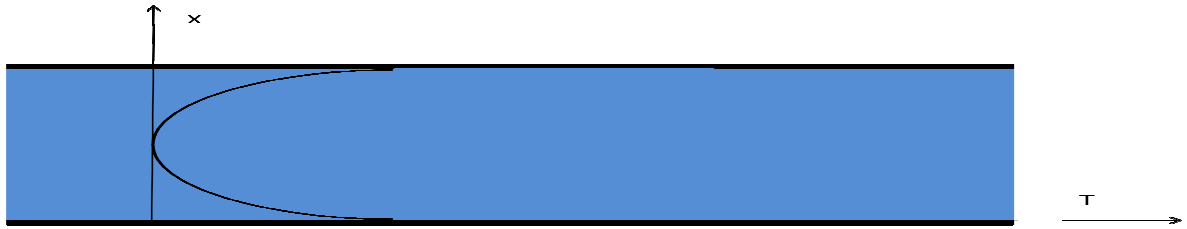
$$\Delta T = 0,139 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Nitidamente insuficiente para os dispositivos de leitura disponíveis. Pode ser perfeitamente desprezado o efeito do alumínio, até porque desprezando o alumínio estamos a admitir entre duas situações, a pior. Como veremos mais à frente, é sempre tomada a decisão da pior situação quando existem duas propostas.

### 3.1.4. Pontos a considerar na modelação para o fluído que circula no absorvedor

Foi também considerado que a temperatura da água é igual em toda a área, isto é que não existia gradiente térmico entre a zona junto ao tubo e o centro.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico



Porém, existem vários pontos que levaram a considerar a temperatura do fluido constante para todo o perfil do escoamento:

- A diferença térmica entre o centro e o ponto de contacto com o tubo é relativamente baixa
- O escoamento (como veremos mais adiante) é turbulento, pelo que a curva é mais achatada, levando a que a temperatura seja relativamente constante no perfil todo
- Não está em estudo a variação de temperatura no escoamento, e essa variação não é importante para o estudo em causa.

Considerou-se para efeitos de transferência de calor uma temperatura média do fluido, isto é, não foi feita uma estratificação do tubo no sentido do escoamento. Na verdade, sabe-se que existe uma diferença de temperatura entre o início do tubo e o final, mas na realidade a diferença não é suficientemente grande para influenciar o comportamento do absorvedor na transferência de calor e consequentemente no rendimento do colector.

### Real



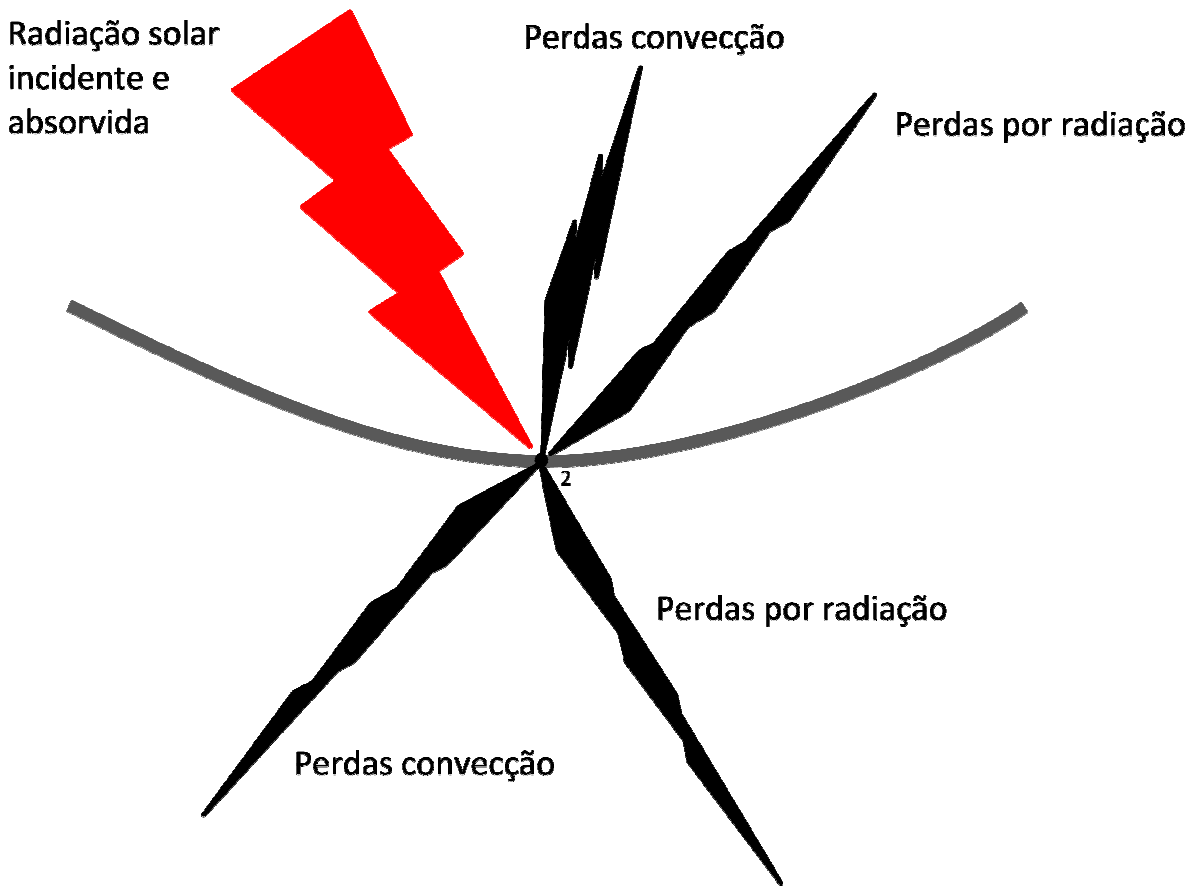
### Considerado



não considerada

### 3.1.5. Análise do comportamento do concentrador

Considerou-se também que a temperatura do concentrador é igual à temperatura ambiente. Esta é uma simplificação que merece uma explicação pormenorizada.



Como podemos verificar através da imagem anterior, os fenómenos de transferência de calor no concentrador são:

- Absorção da radiação solar incidente,
- Emissão da radiação solar incidente (seja para o céu ou para o chão),
- Perdas por convecção para o exterior (pela parte superior e inferior do concentrador).

Considerando as seguintes propriedades para o material do concentrador:

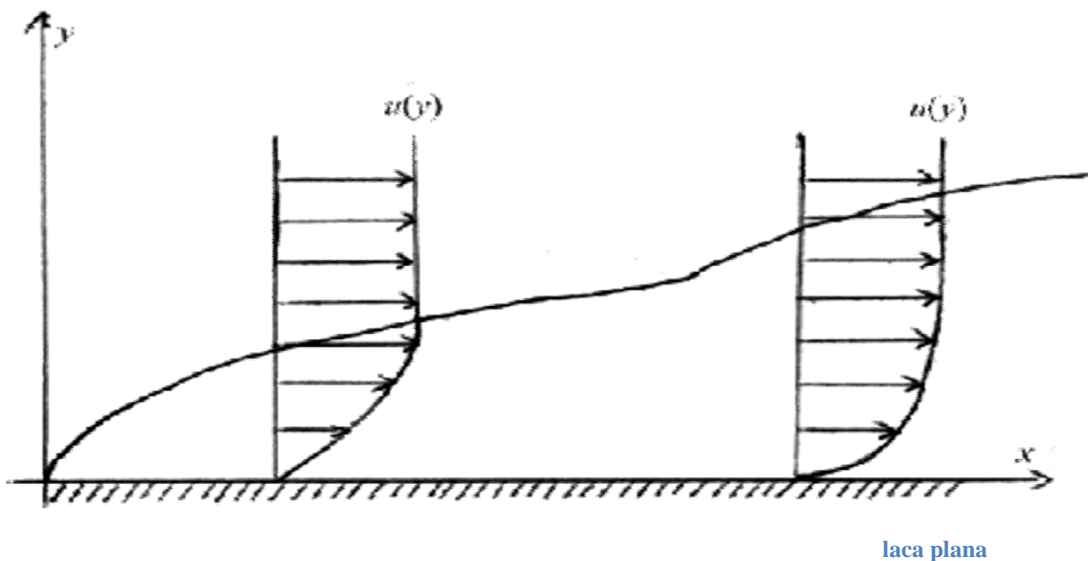
- Chapa de alumínio polido de 0,5mm de espessura,
- Reflectividade total de 95%,
- Absorção de 5%,
- Corpo cinzento, isto é, emissividade de 5%,
- A inexistência do absorvedor,
- Radiação incidente de  $1000\text{W/m}^2$ ,
- Vento na ordem dos 10m/s,
- Temperatura do céu de  $-5^\circ\text{C}$ ,
- Temperatura exterior de  $15^\circ\text{C}$ .

Calculemos agora qual será a temperatura do absorvedor nestas condições.

Para calcular o coeficiente de convecção temos um grande problema. Para este tipo de geometria não existem correlações. Por isso o mais correcto seria trabalhar com um programa de CFD e saber os valores mais correctos para a convecção. No âmbito deste projecto, não é necessário este tipo de detalhe, até porque como iremos referir a importância no resultado final é perfeitamente desprezável.

### Concentrador como placa plana

Consideremos portanto uma situação simplificada, de uma chapa plana com vento a incidir e calculemos o coeficiente de convecção exterior. No final aplicaremos um coeficiente de correcção para considerar uma hipótese menos favorável possível.



Para a placa plana já existem correlações nomeadamente no programa de modelação do EES, pelo que se torna desnecessário estar a explicar a teoria por trás da transferência de calor por convecção forçada numa placa plana.

No EES como já foi referido existe uma base de formulações e subrotinas já existentes, de entre as quais temos acesso a uma que nos indica vários parâmetros para um determinado escoamento exterior numa placa plana. De entre esses parâmetros temos o coeficiente de convecção.

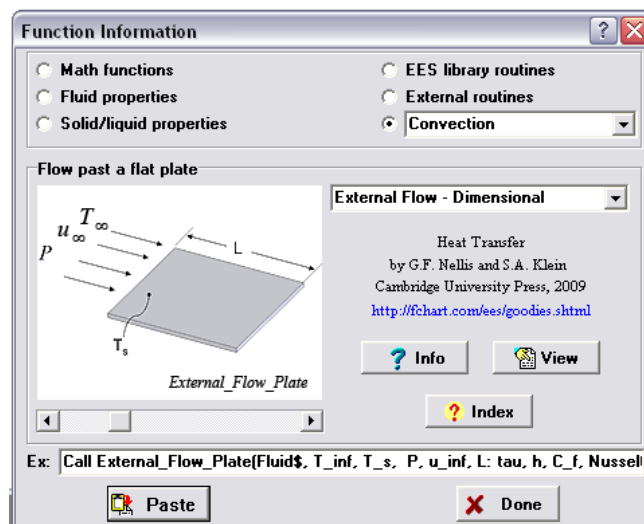


Figura 46 - Janela do EES para calcular coeficiente de convecção numa placa plana

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Para resolver o problema, o programa pede que se insira o fluido em causa, a temperatura a que se encontra o fluido (exterior neste caso), a temperatura da superfície, a pressão (pressão ambiente, 101kPa), a velocidade do escoamento e o comprimento da chapa. Todos estes parâmetros são conhecidos com excepção da temperatura da superfície. Consideremos uma tabela onde calculamos o coeficiente convecção para várias temperaturas da superfície, onde a solução para ser mais fácil de visualizar será apresentada em gráfico.

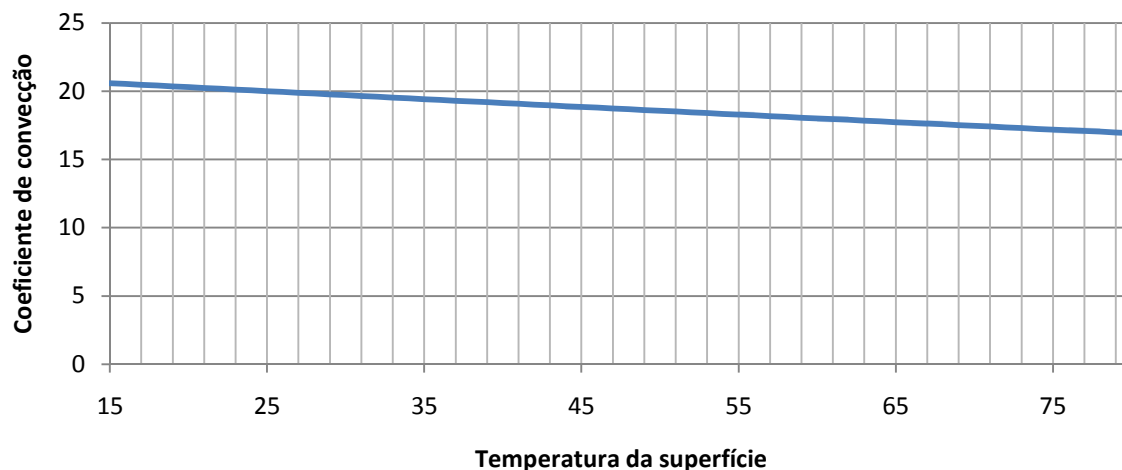


Figura 47 - Evolução do coeficiente convecção numa placa plana para diferentes valores da temperatura superficial

Como se pode verificar, a variação do coeficiente de convecção não é significativa, sendo que é razoável apontar para um valor em torno de  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

### Concentrador como cilindro

Faça-se agora outro exercício, considerar que o coeficiente de convecção no concentrador não é sobre uma placa plana, mas sim num cilindro com diâmetro da placa plana.

Mais uma vez o EES tem na sua biblioteca uma subrotina que nos permite fazer este cálculo.

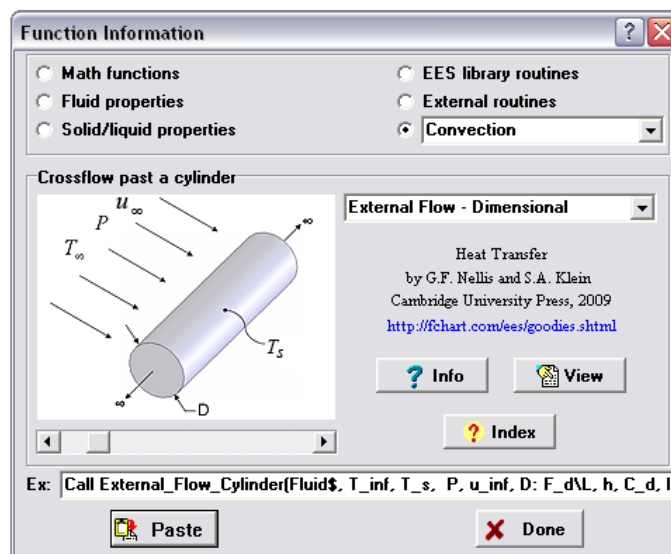


Figura 48 - Janela do EES para calcular coeficiente de convecção num cilindro com vento a incidir na perpendicular ao eixo



As variáveis de entrada nesta subrotina são exactamente iguais à anterior, com excepção do comprimento da placa, que neste caso é substituído pelo diâmetro do cilindro. Ou seja, o problema de ser necessário considerar uma temperatura da superfície. Por isso, tal como no exemplo anterior, construiu-se uma tabela onde para um valor de temperatura da superfície é indicado o coeficiente de convecção equivalente.

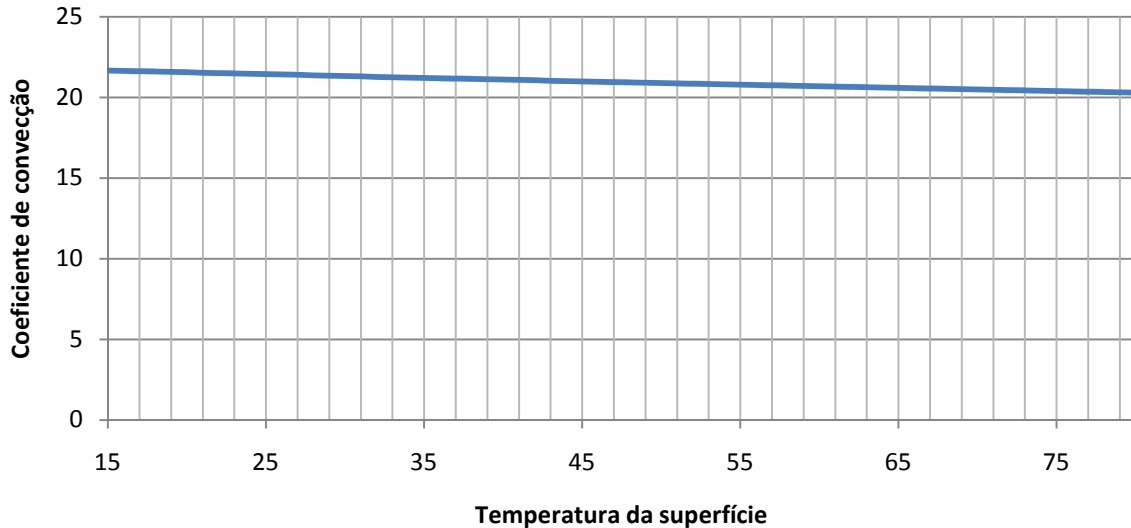


Figura 49 - Evolução do coeficiente convecção num cilindro para diferentes valores da temperatura superficial

Como se pode observar, a variação do coeficiente de convecção é ainda mais reduzida que no caso da placa plana e situa-se em torno do mesmo valor desta última.

Consideremos, por isso, para o estudo dos fenómenos de transferência de calor no concentrador um coeficiente de convecção para o exterior de  $20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

### Modelação da temperatura do concentrador e conclusões

Passemos agora a analisar os fenómenos de transferência de presentes no concentrador. De uma forma geral existe outra simplificação que foi tomada nesta modelação, considerou-se que a temperatura no concentrador era constante. Tal não se verifica, pois é sabido a temperatura varia ao longo da curva e varia ao longo da espessura da chapa. Porém, uma chapa de alumínio com 0,5mm, como já vimos anteriormente tem uma variação de temperatura muito pequena. Por outro lado, a variação ao longo da curva também não é significativa, até porque nessa situação por exemplo teria de ser calculado um coeficiente de convecção para o exterior local e não global como o que foi calculado. Ou seja a hipótese de considerar o concentrador a uma temperatura uniforme é perfeitamente viável para o efeito que se pretende.

Podemos então afirmar que no concentrador, da radiação solar incidente, parte é reflectida e por isso não contribui para o aquecimento deste, e outra parte é absorvida. Dessa parte, alguma vai ser perdida para o exterior por convecção, e consideraremos que o ar na parte superior está à mesma temperatura do ar na parte inferior, para além de que o coeficiente de convecção é igual. No caso das perdas por radiação, consideramos diferente porque a temperatura do céu (ainda por cima com condições de céu limpo como é o caso do funcionamento de um colector do género do estudado) é bastante diferente da do ar ambiente. Existem também equações que nos dão a temperatura do céu em relação a uma dada

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

temperatura ambiente. Neste caso considerou-se uma temperatura do céu 20 °C abaixo da temperatura ambiente, um valor típico.

Sabemos que então a equação (simplificada) que rege os fenómenos de transferência de calor no concentrador é a seguinte:

$$\dot{Q}_{absorvida} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{Rad\ céu} + \dot{Q}_{Rad\ chão}$$

Ou seja:

$$\alpha_{abs} A_{abert} I = 2\alpha_{conv} A_t (T_{conc} - T_e) + \varepsilon\sigma(T_{conc}^4 - T_{céu}^4) + \varepsilon\sigma(T_{conc}^4 - T_{chão}^4)$$

$$0.05 * 1.2 * 2.5 * 1000 = 2 * 20 * 1.295 * 2.5 * (T_{conc} - 15) + \\ + 0.05 * 5.27E - 8 * (T_{conc}^4 - 268.15^4) + 0.05 * 5.27E - 8 * (T_{conc}^4 - 288.15^4)$$

Resultado:

$$T_{conc} = 16.12^{\circ}C$$

Como se pode verificar, a temperatura do concentrador não difere muito da temperatura ambiente, difere, para estas condições cerca de 1°C. Na verdade a influência para a modelação no EES é demasiado pequena para ser considerada.

Para que dúvidas não restem, fez-se um cálculo da temperatura verificado no concentrador para valores de coeficiente de convecção entre 5 a 200 W/(m<sup>2</sup> K)

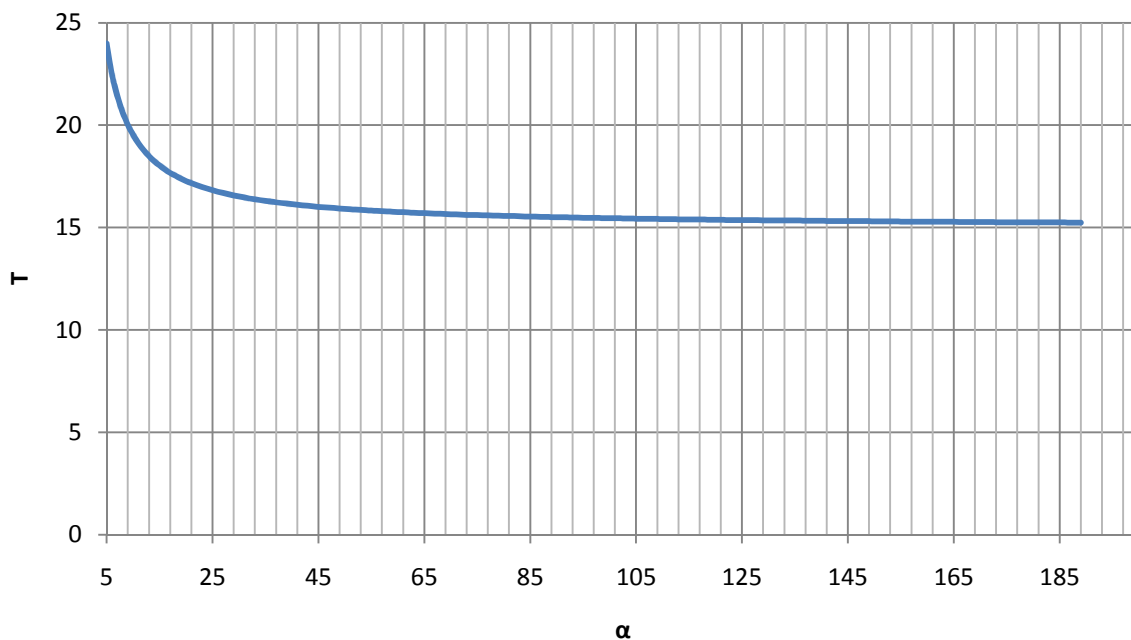


Figura 50 - Evolução da temperatura do concentrador com o coeficiente de convecção

Como podemos ver, a diferença de temperatura não ultrapassa, na pior das hipóteses os 10 °C a do ambiente, o que é pouco para efeitos que serão considerados de seguida para a modelação do absorvedor, porque desta maneira consideramos que as perdas por radiação do absorvedor para o exterior são apenas para o chão, e não para o concentrador.

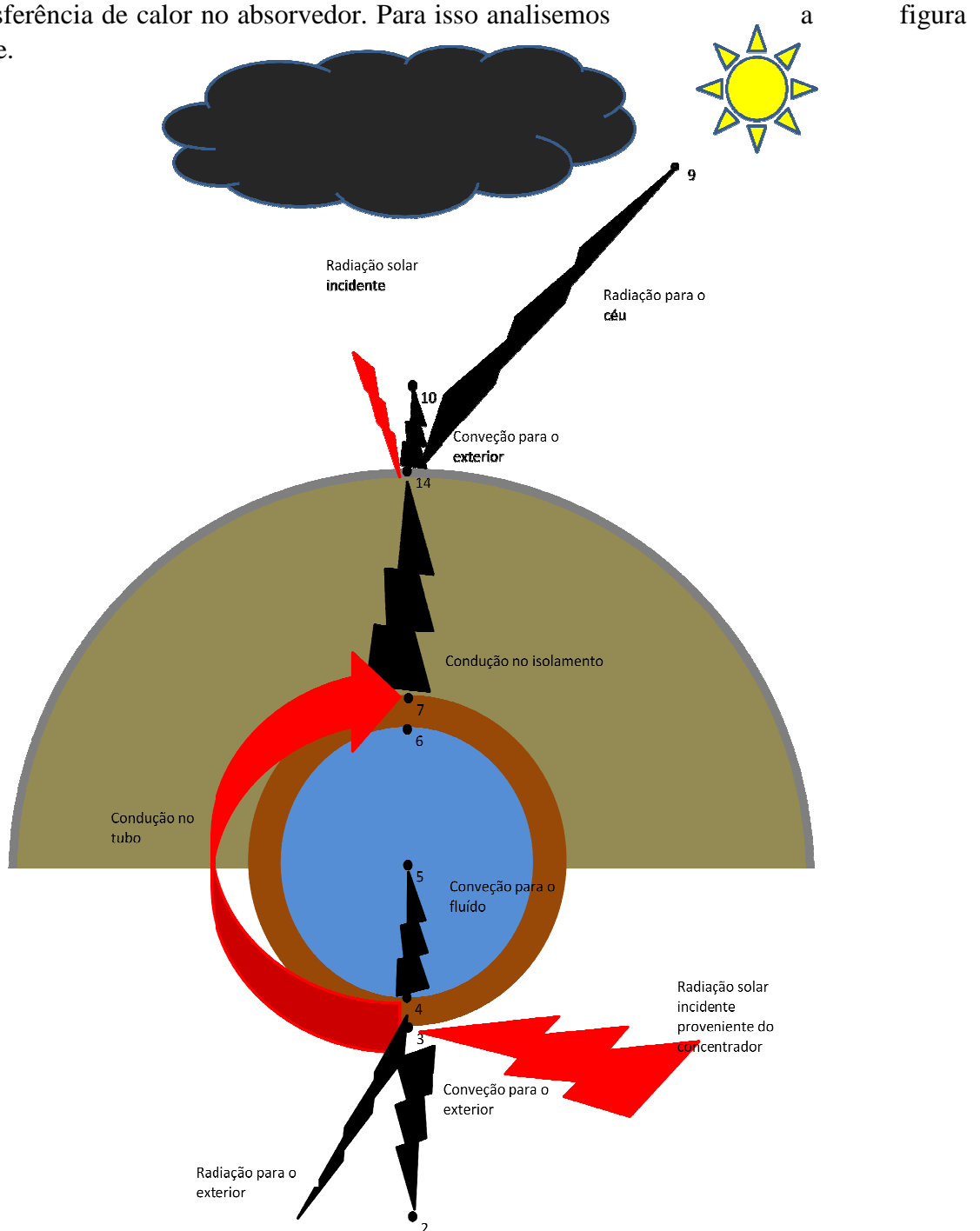
Por outro lado, considerando esta simplificação, está-se a estudar a pior das hipóteses em causa, tendo em conta que a temperatura do concentrador será maior que a temperatura

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

ambiente, por isso ponderando que o concentrador se encontra à temperatura ambiente, estamos a maximizar as perdas para o exterior por radiação em relação ao que se regista na realidade, tendo em consideração que na verdade as perdas são menores visto a temperatura do concentrador ser mais alta.

### 3.1.6. Análise da transferência de calor no absorvedor

Admitindo todas as simplificações efectuadas, passemos agora a analisar os fenómenos de transferência de calor no absorvedor. Para isso analisemos seguinte.



De uma forma geral passemos a compreender a transferência de calor em cada ponto.

### 3.1.7. Condução no tubo de cobre do absorvedor

O ponto 3 e 4 podem ser agrupados num único ponto visto que ao considerarmos que estão à mesma temperatura, então a resistência à condução é nula, ou seja, podemos agrupar os fenômenos num único ponto. Se 3 e 4 não estivessem à mesma temperatura tínhamos os seguintes fenômenos:

#### Ponto 3:

- Radiação solar incidente e absorvida, a reflectida não assume especial importância visto que a reflectividade da superfície do absorvedor é muito baixa. Nesse cálculo não entra a temperatura do absorvedor. Essa radiação serve apenas para cálculo da temperatura ambiente, considerada constante e conhecida para o problema.
- Transferência de calor para o ambiente por convecção (forçada, foi o que foi considerado, mas em determinadas condições meteorológicas pode ser convecção natural)
- Transferência de calor para as superfícies do ambiente (chão), consideradas à mesma temperatura ambiente e como corpo negro.
- Transferência de calor para o ponto 4 por condução.
- Transferência de calor para os pontos 6 e 7, considerando que estes dois pontos estão à mesma temperatura, isto é, são um único ponto. Essa questão será abordada de seguida.

#### Ponto 4:

- Transferência de calor de 3 para o ponto 4 por condução
- Transferência para o fluido por convecção interior forçada.
- Transferência de calor para os pontos 6 e 7

Considerando que o ponto 3 e 4 estão à mesma temperatura, então consideremos apenas o ponto 3 (como podia ser também o ponto 4):

- Radiação incidente e absorvida.
- Perdas por convecção para o exterior.
- Perdas por radiação para o chão.
- Calor transferido para o fluido por convecção forçada interior.

Façamos agora o mesmo raciocínio para os pontos 6 e 7. Considerando os pontos 6 e 7 independentes teríamos presentes:

#### Ponto 6:

- Calor transferido de 3 para 6 por condução.
- Transferência de calor para o fluido no interior por convecção forçada interior.
- Transferência de calor por convecção para o ponto 7.

#### Ponto 7:

- Transferência de calor por convecção do ponto 6.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

- Transferência de calor por condução para o ponto 14, ou seja, análise do comportamento do isolamento.

Considerando a mesma simplificação que foi operada para os pontos 3 e 4, consideremos então que no ponto 7 temos:

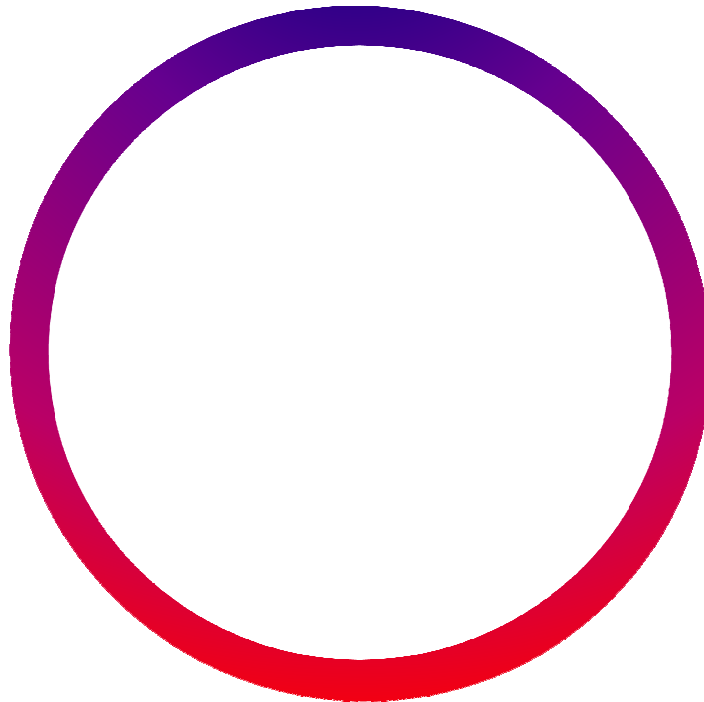
- Calor recebido do ponto 3 (equivalente a 3 e 4).
- Condução no isolamento.
- Calor transferido para o fluido por convecção forçada interior.

Como é evidente, esta análise foi bastante simplificada, mas resumindo pode aplicar-se este raciocínio porque:

- A espessura do tubo é reduzida,
- A condutibilidade do cobre é elevada,
- Existem duas zonas distintas de transferência (com e sem isolamento).

Ou seja é mais importante caracterizar o comportamento tendo em conta duas zonas distintas (pontos 3 e 7) do que discriminar pontos dentro dessas duas zonas.

Para uma análise mais detalhada seria necessário proceder a uma modelação no EES considerando condução bidimensional elaborando equações por de trás desse raciocínio, que mais não são que as equações básicas de condução do calor. Podia também recorrer-se a programas onde é feita uma malha de pontos e onde é calculada a condução bidimensional automaticamente bastando para isso definir apenas uma série de parâmetros.



nelha mais quente)

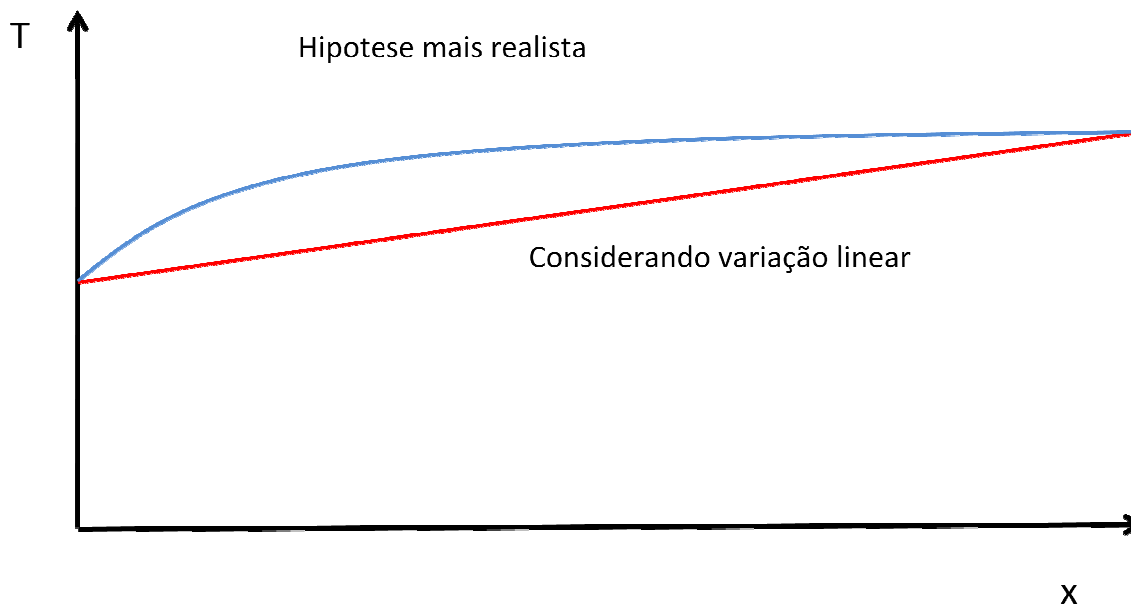
Analisemos agora o ponto 14. Este ponto, como já foi referido já parte de uma simplificação porque se está a considerar que toda a protecção em alumínio está à mesma temperatura. E à temperatura da superfície do isolamento, que por sua vez também se encontra à mesma temperatura (apenas a superfície).

Assim sendo estão presentes os seguintes fenómenos:

- Condução do ponto 7 para o 14, sendo que esta transferência de calor é muito importante, pois define o bom ou mau isolamento da lã de rocha.
- Perda de calor para o ambiente por convecção forçada. A convecção pode ser também natural, mas neste caso a situação é mais favorável.
- Perda de calor para as superfícies exteriores por radiação. Neste caso, consideramos a pior situação, isto é, considerou-se que as perdas de calor por radiação para o exterior são na totalidade para o céu, visto que este está a uma temperatura mais baixa que o ambiente. Considera-se também que o céu se comporta como um corpo negro.
- Calor recebido por radiação solar incidente que é absorvida. De forma a que a radiação solar incidente absorvida não fosse muito elevada, não se pintou a superfície, ficando esta em alumínio polido que contribui para que a reflectividade seja relativamente elevada.

### 3.1.8. Transferência de calor por convecção para o fluído no interior

Outra situação que foi necessário estudar foi a transferência de calor por convecção forçada no interior do tubo. Para começar estudemos qual a temperatura a considerar no fluído, esta representa a temperatura média a que se encontra o fluído. Existem várias formas de considerar uma temperatura média para o fluído. Uma delas passa por considerar a média aritmética entre a temperatura de entrada e a temperatura de saída. Como se sabe, talvez não seja a melhor forma de considerar uma temperatura média no colector, porque a evolução da temperatura ao longo do tubo não é linear, mas segue a forma da figura abaixo apresentada.



Para uma hipótese mais realista teria de se considerar a teoria usada nos permutadores de calor e considerar a temperatura média logarítmica. Esta fornece a temperatura média mais próxima daquilo que é na realidade. Para a temperatura média logarítmica temos:

$$\theta_{ln} = \frac{(T_{5s} - T_{5e})}{\ln((T_4 - T_{5e})/(T_4 - T_{5s}))}$$

Porém esta formulação introduz alguns problemas, entre os quais:

- O EES tem algumas dificuldades em resolver algumas operações matemáticas, nas quais o logaritmo se enquadra. É necessário criar uma operação de lógica de forma a não dar erro, ou limitar as variáveis. Desta forma aumenta-se a complexidade e o programa tende a ficar bastante mais lento.
- É normalmente necessário também aumentar o erro inerente às variáveis

Como as diferenças de temperatura para a situação de caudal considerada não são significativas, passou a considerar-se a temperatura média aritmética como a temperatura do fluido no interior. Para além disso, são feitas várias simplificações no programa de modelação (desde coeficientes de transferência de calor ao caudal da bomba), que não faz muito sentido ser muito rigoroso neste parâmetro.

Contudo e para provar que esta aproximação serve os objectivos traçados para a modelação, foi elaborada uma modelação para o protótipo assente na temperatura média aritmética, mas posteriormente, fez-se uma alteração para analisar os efeitos desta aproximação. Como podemos ver pela tabela seguinte, ao fim de 3 horas o resultado da temperatura no tanque (regime instacionário) entre simulações varia em  $0,15^{\circ}\text{C}$ , com um erro relativo de 0,33%. Podemos então concluir que o erro cometido é demasiado pequeno para o objectivo da modelação, até porque nesta modelação são tidas em conta aproximações mais grosseiras.

**Tabela 1 - Evolução da modelação com temperatura média aritmética e logaritmica**

Tempo (h)	Aritmética ( $^{\circ}\text{C}$ )	Logaritmica ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\epsilon$	$\epsilon_r$
0	22	22	0	0,00
0,5	26,09	26,11	0,02	0,08
1	30,13	30,17	0,04	0,13
1,5	34,12	34,19	0,07	0,20
2	38,05	38,15	0,1	0,26
2,5	41,93	42,05	0,12	0,29

Para o cálculo da convecção no interior é necessário conhecer a velocidade do escoamento. Para tal, é necessário conhecer o caudal que circula e a área interior. A área do interior é fácil de calcular, por se tratar de um tubo simples, apenas foi necessário medir diâmetro do interior e calcular a área de um círculo. O caudal que circula não é tão fácil de calcular. Existiam aqui 2 alternativas, uma de cariz mais técnica e outra mais prática, como veremos de seguida.

Uma delas consistia em encontrar dados do fabricante da bomba circuladora instaladora, estimar as perdas de carga e pela curva da bomba retirar o caudal que circula.

Outra solução passaria por verificar o caudal que de facto circula, seja com recurso a um rotâmetro ou através da técnica bastante simples (mas muito eficaz) de medir com recurso a um recipiente a quantidade de fluido num determinado espaço de tempo.

## Caudal pela curva da bomba

A bomba instalada era uma Grundfos UPS 15-40 130, mais adiante veremos que foi utilizada uma bomba diferente, quando se mudou o depósito de 150l para um de 500l, mas nessa altura serão apresentados apenas os valores finais.

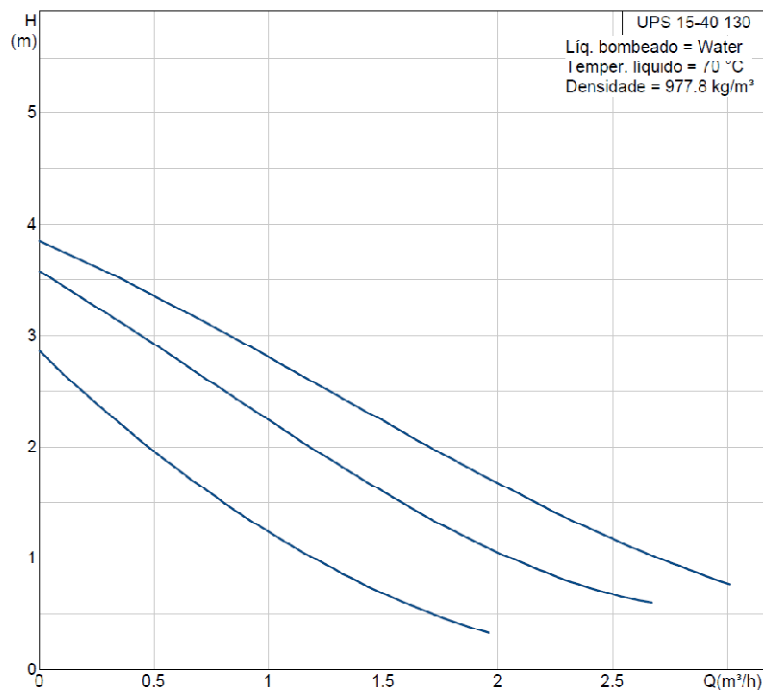


Figura 54 - Curva da bomba Grundfos 15-40 130

Como a informação em forma de gráfico é difícil de tratar a nível de software de modelação e mesmo em Excel, o que foi feito foi, com recurso a alguns pontos da curva, tentar arranjar uma equação aproximada da curva da bomba.

$$H = 0,0106Q^3 - 0,317Q^2 - 1,96Q + 2,85 \quad \text{para posição1}$$

$$H = 0,0933Q^3 - 0,206Q^2 - 1,23Q + 3,57 \quad \text{para posição2}$$

$$H = 0,0480Q^3 - 0,0183Q^2 - 0,911Q + 3,85 \quad \text{para posição3}$$

Posteriormente, para o cálculo da perda de carga interna foi usado o comprimento do tubo corrugado de 15 m, tendo em conta as características técnicas do mesmo. Juntamos a isso a perda de carga da serpentina e também no colector.

Tal como para escoamentos externos, o EES disponibiliza na sua biblioteca de rotinas, uma que permite fazer o cálculo do coeficiente de convecção, perda de carga, número de Reynolds, entre outros.

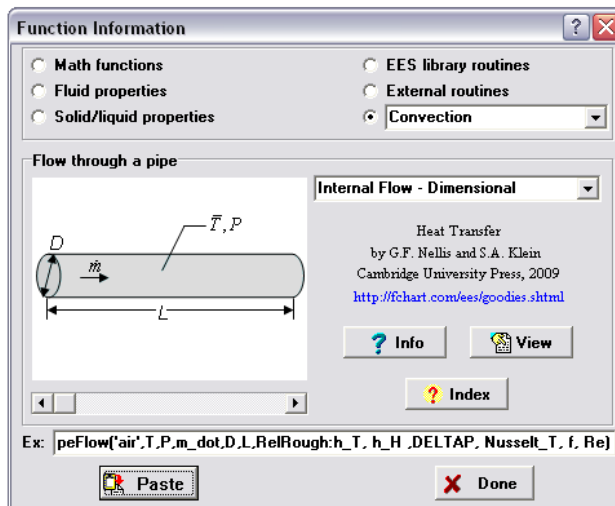


Figura 55 - Janela do EES para calcular coeficiente de convecção no interior de um tubo



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

A perda de carga é dada em pressão, pelo que para introduzir na equação da bomba era necessário passar para altura de coluna de água.

$$\Delta P = \Delta h * \rho * g$$

Fez-se uma estimativa do caudal que devíamos obter e chegou-se à conclusão que o caudal andava em torno de 0,107 para a velocidade II da bomba.

### Medição de caudal

Para se ter a modelação mais correcta optou-se por fazer também a mediação do caudal que circulava. Como já se referiu, bastou medir a quantidade de fluido num recipiente, pesar e cronometrar o tempo.

Ao fazer-se este exercício, o circuito de circulação é aberto, pelo que, o caudal medido dá ligeiramente menor do que aquele que efectivamente circula. Tal acontece porque ao abrir o circuito, a pressão a montante é a pressão atmosférica, por isso é necessário fazer a elevação até à altura do colector, que está a cerca de 2m, não sendo por isso desprezável. Por isso, o que se fez foi abrir o circuito, mas a sucção de água para a entrada desta está também a 2m de altura.

Foram feitas 5 medições, cada uma delas para uma velocidade da bomba. A balança disponível apresentava uma resolução de 10 gramas, e o cronómetro de 1segundo.

Tabela 2 - Ensaio para velocidade da bomba em III

Ensaio	Peso total (kg)	Peso recipiente (kg)	Tempo (m:s)	Caudal (kg/s)
1	13,46	0,85	1 : 3 1	0,139
2	17,17	0,85	2 : 0 1	0,135
3	9,54	0,85	1 : 0 4	0,136
4	21,23	0,86	2 : 2 9	0,137
5	21,94	0,87	2 : 3 5	0,136

Tabela 3 - Ensaio para velocidade da bomba em II

Ensaio	Peso total (kg)	Peso recipiente (kg)	Tempo (m:s)	Caudal (kg/s)
1	18,05	0,91	2 : 1 0	0,132
2	22,16	0,87	2 : 4 2	0,131
3	9,11	0,87	1 : 0 0	0,137
4	9,76	0,87	1 : 0 5	0,137
5	19,91	0,89	2 : 2 7	0,129

De uma forma geral para a velocidade III o caudal é aproximadamente 0,136 kg/s, enquanto que, para a velocidade II o caudal baixa para 0,133kg/s.

## Conclusão

Como podemos verificar, o caudal calculado com recurso à curva da bomba e considerando 15m de tubo corrugado deu bastante abaixo do que foi realmente testado, desta forma, optou-se por corrigir o comprimento de tubo corrugado até um valor que desse aproximadamente o caudal medido. Considerando que o tubo corrugado tem cerca de 10m o valor do caudal na modelação sobe para 0,130kg/s na velocidade II.

Para a velocidade III, a modelação indica-nos um valor de 0,138kg/s, considerando o comprimento de tubo corrugado de 10m. Ou seja, o valor anda em torno do esperado para ambas as velocidades se considerar 10m de tubo corrugado.

Para os cálculos da modelação será usado os valores da curva da bomba, fornecida pelo fornecedor.

Para cálculos práticos será usado como referência os valores obtidos nos ensaios.

### 3.1.9. Transferência de calor por convecção do absorvedor para o exterior

Vamos agora analisar a transferência de calor por convecção do absorvedor para o exterior. Neste caso é difícil prever o escoamento em torno do mesmo, pelas seguintes razões:

- Não é possível saber a velocidade exacta do vento;
- Não é possível conhecer o ângulo de incidência do escoamento;
- A geometria do absorvedor é complexa, não existindo por isso correlações para esta geometria.

Sobre o primeiro ponto, existiam várias propostas. A primeira proposta seria arranjar dados sobre o vento para aquele dia, recorrendo à base de dados (Solterm). Esta base indica-nos as condições climáticas esperadas (temperatura ambiente, radiação solar directa e difusa, humidade relativa, velocidade do vento, entre outras) para o dia e para uma determinada hora, tendo em conta os dados climáticos dos últimos 30 anos.

Outra proposta passava por considerar a velocidade média do vento para o local, tendo em conta, também, dados climáticos. Por exemplo, em Portugal, uma velocidade média do vento de 5 a 10 m/s é o esperado para todo o continente.

Uma proposta alternativa passava por conseguir saber qual o vento para determinado dia através de um transdutor da velocidade do vento, o cata-vento, para depois introduzir na modelação.

De entre estas propostas foram consideradas as duas últimas, pelas seguintes razões:

- Na primeira proposta estamos a referir-nos a um regime que é esperado, mas a verdade é que nem sempre acontece. Por vezes as condições climáticas são completamente diferentes. Assim, para elaborar uma modelação e compara com o registo diário, não é adequado, uma vez que as condições existentes comparadas com as previstas podem ser distintas. Poderia ser usada para cálculos de produtividade ao longo do ano, ou seja, avaliação da fracção solar;
- Para cálculo de fracção solar e de desempenho do colector para um período de tempo alargado, as condições climáticas médias são suficientes, ou pelo menos fornecem uma aproximação bastante razoável, pelo menos no que se refere à velocidade do vento;

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

- Para comparação entre modelação e dados obtidos, o mais indicado seria usar um cata-vento e colocar a medição ao longo do dia na modelação. Como não estava disponível este tipo de equipamento, optou-se pela solução de utilizar a velocidade média do vento. Uma das evoluções no protótipo será no futuro instalar um central de dados meteorológicos.

Outro dos problemas existentes prendia-se com a questão do ângulo de incidência do vento, isto é, o vento pode incidir de várias formas, e com vários ângulos. Como é sabido, o mais correcto seria conhecer o ângulo de incidência do vento ao longo do dia e num programa de CDF calcular o coeficiente de transferência de calor para o exterior. Como já foi dito, isso não foi calculado dessa maneira, porque implicaria fazer um estudo exaustivo de um parâmetro que facilmente pode ser estimado e majorado de forma a considerar a pior situação presente.

Para começar a explicar o processo de cálculo do coeficiente de convecção interior consideremos duas situações para a incidência do vento no absorvedor:

Incidência no sentido do absorvedor

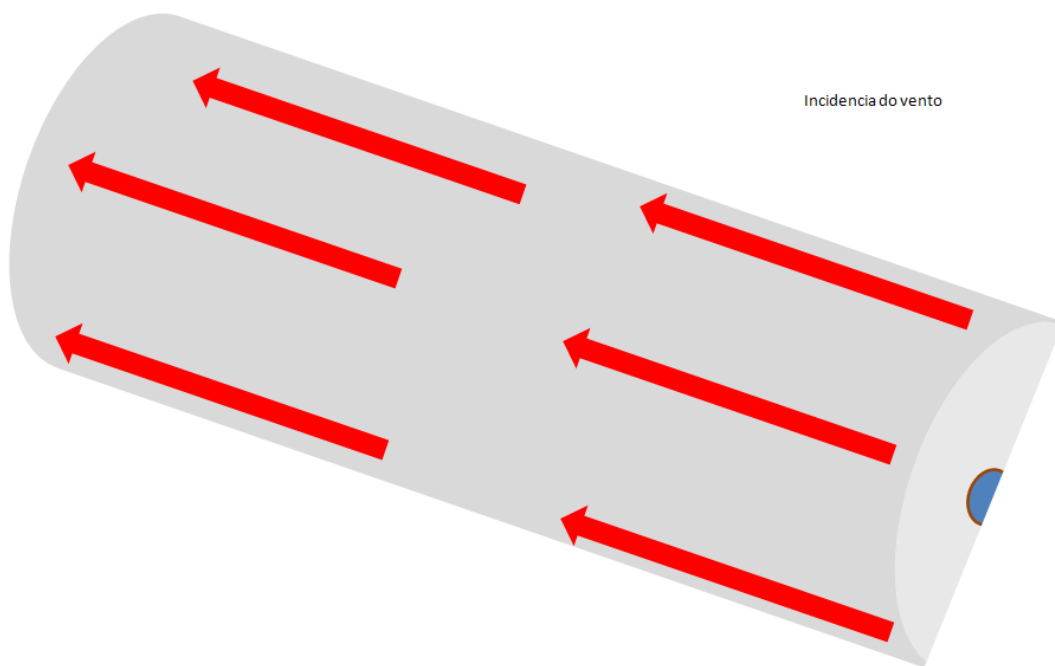


Figura 56 - Incidência no sentido do absorvedor

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Incidência na perpendicular ao absorvedor

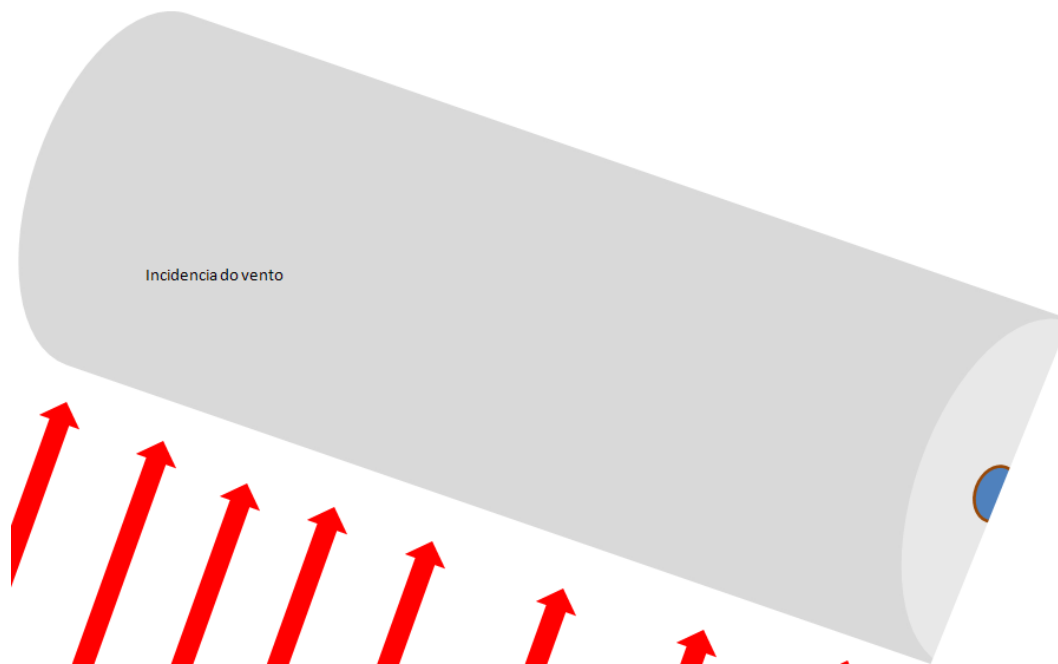


Figura 57 - Incidência na perpendicular ao absorvedor

Consideremos a primeira situação. Neste caso, para ser caracterizado o escoamento e consequentemente o cálculo do coeficiente de convecção teríamos de recorrer a um software de modelação de escoamentos porque para esta geometria não existem correlações.

Como simplificação podemos considerar que o escoamento neste sentido é igual a uma chapa plana. Desta forma temos 2 tipos de convecção. Uma convecção na parte inferior do absorvedor e outra na superior. Na parte inferior temos uma chapa plana com comprimento de 2,5m e com largura de  $\pi * 0,022$ , enquanto que na parte superior temos os mesmos 3,5 metros de comprimento mas a largura é  $\pi * (0,02 + 2 * 0,04)$ .

O EES também inclui na sua biblioteca uma série de funções com correlações para escoamentos forçados, nomeadamente escoamentos externos forçados sobre placa plana, como aliás já foi apresentado anteriormente.

Faça-se então uma modelação simples do coeficiente de convecção numa placa com a largura da parte inferior variando a temperatura da parede de 20 °C até 300 °C e com um regime de ventos de 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 e 20m/s.

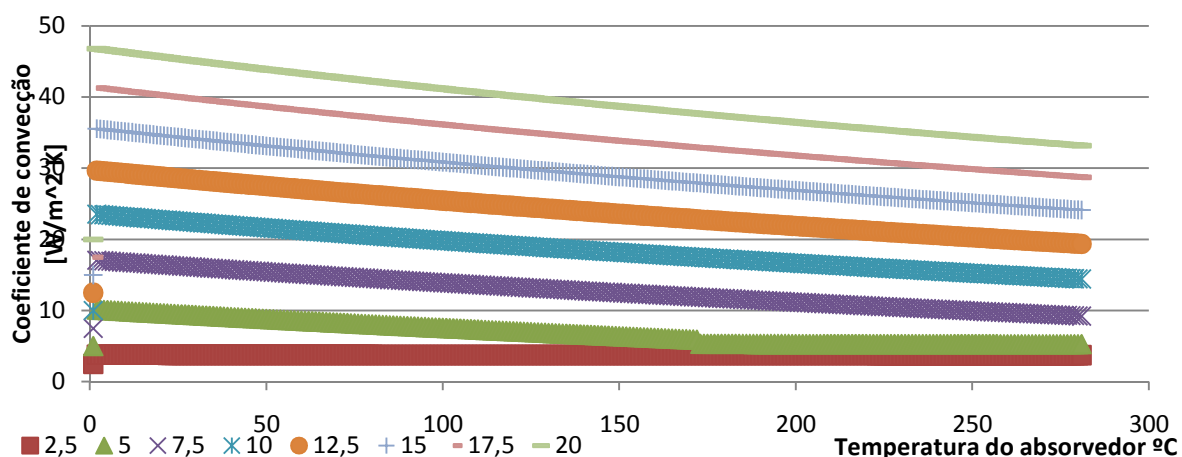


Figura 58 - Evolução do coeficiente de convecção para placa plana com variação da temperatura e da velocidade do vento

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Para a parte superior do absorvedor o raciocínio é o mesmo, e os resultados também, porque para a placa plana o programa pede como dados a temperatura ambiente, a temperatura da superfície, a velocidade do vento incidente, o comprimento da chapa (comprimento do absorvedor) e a pressão ambiente.

Consideremos agora o escoamento segundo caso, onde o vento incide na perpendicular ao escoamento.

Neste caso temos de fazer várias considerações, porque o escoamento torna-se bastante completo.

Numa primeira aproximação podemos considerar que o escoamento que se desenvolve na parte superior (com o isolamento) não interfere na parte inferior, e em princípio tal não

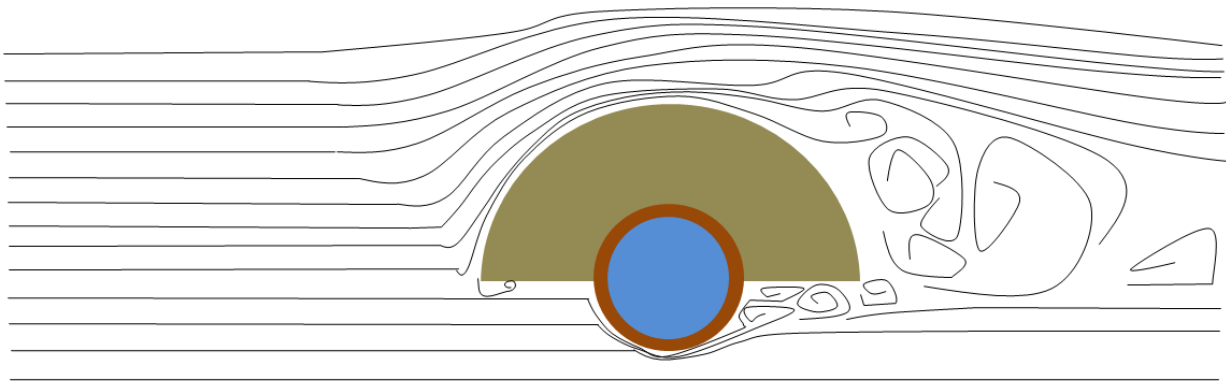


Figura 59 - Escoamento em torno do absorvedor com vento na perpendicular

deve acontecer. Porém é necessária atenção porque no canto inferior cria-se uma perturbação que pode influenciar o escoamento inferior, tal como se mostra na imagem 48.

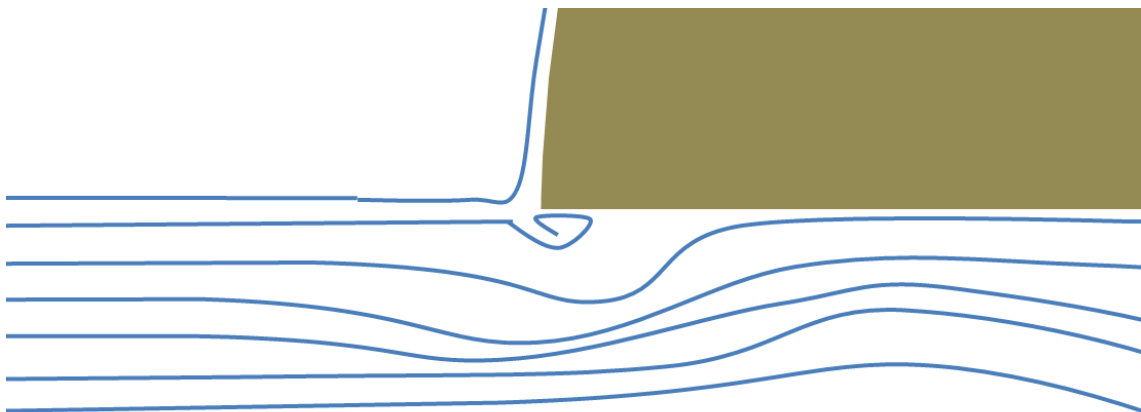


Figura 60 - Pormenor de possível perturbação no escoamento a zona inferior do absorvedor

Outra questão existente prende-se com o facto de o escoamento na zona inferior quando chega ao tubo do absorvedor (onde circula o fluído) já vir perturbado pelo que existe na zona anterior. Isto é, o escoamento não incide directamente no tubo porque antes tem a parte de isolamento que afecta o escoamento. Vejamus a imagem seguinte para se compreender melhor aquilo que está a ser referido.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

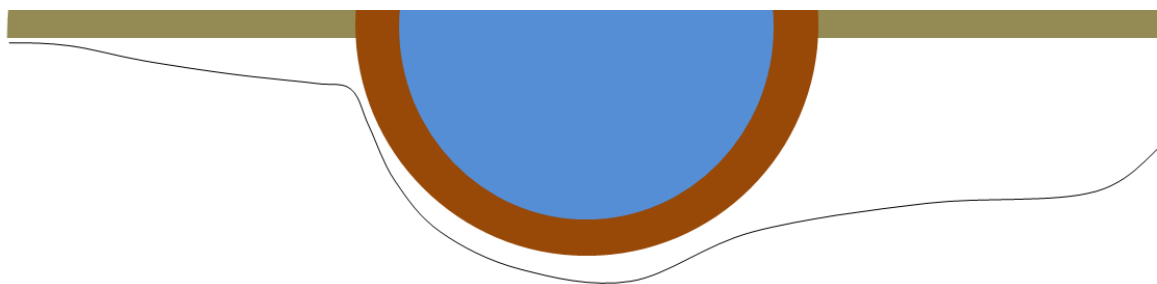


Figura 61 - Evolução da camada limite na parte inferior do absorvedor

Como já foi referido, o que acontece é que para se estudar os fenómenos que acontecem no absorvedor seria necessário recorrer a software específico, isso implica tempo e dinheiro. Para além desse problema existe a questão relacionada com a construção do protótipo, isto é, por muito rigorosa que seja a construção nunca é igual ao protótipo simulado, por isso não compensa perder tanto tempo em simulações muito precisas quando na realidade o protótipo existente não tem correspondência com o esperado.

Por isso optou-se por considerar-se que o escoamento que incide no tubo da zona inferior do absorvedor não sofreu nenhuma perturbação, sabemos que tal não é verdadeiro, mas depois de se obter o resultado final pode corrigir-se com um factor que majore o efeito e assim, tal como anteriormente está-se a considerar a pior das situações possíveis.

Tal como já anteriormente foi referido, o programa EES tem na sua biblioteca escoamentos externos forçados, por isso o que foi elaborado foi uma modelação muito semelhante à anterior, isto é, com regime de ventos a variar de 2,5m/s até 20m/s com passo de 2,5m/s e para temperatura da superfície a variar entre 10 e 300°C.

Para a parte superior os resultados obtidos foram:

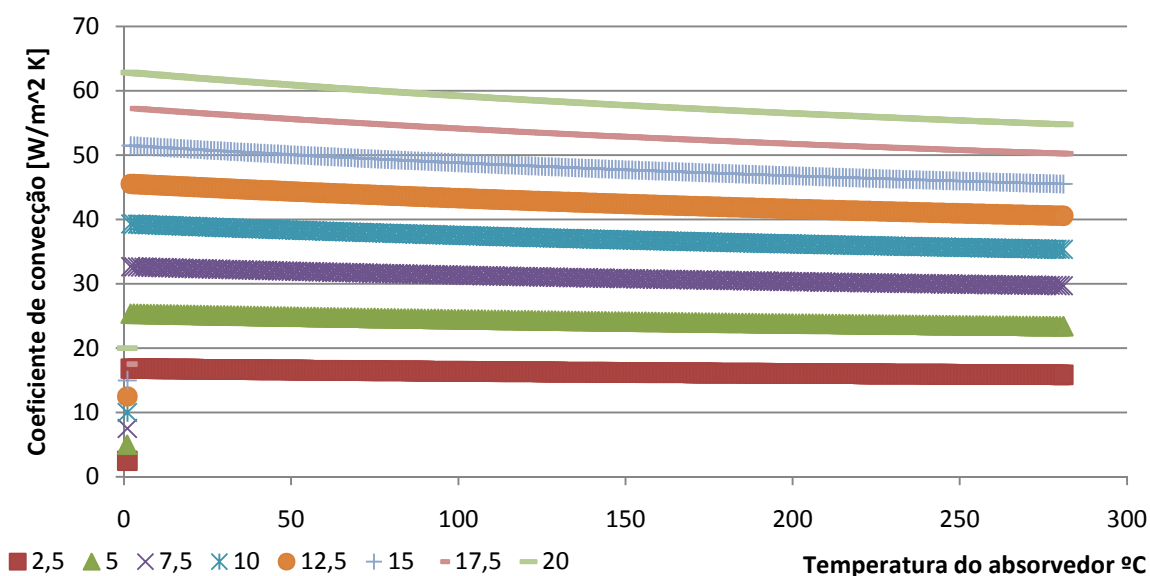


Figura 62 - Coeficiente de convecção na parte superior para um escoamento incidente na perpendicular

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

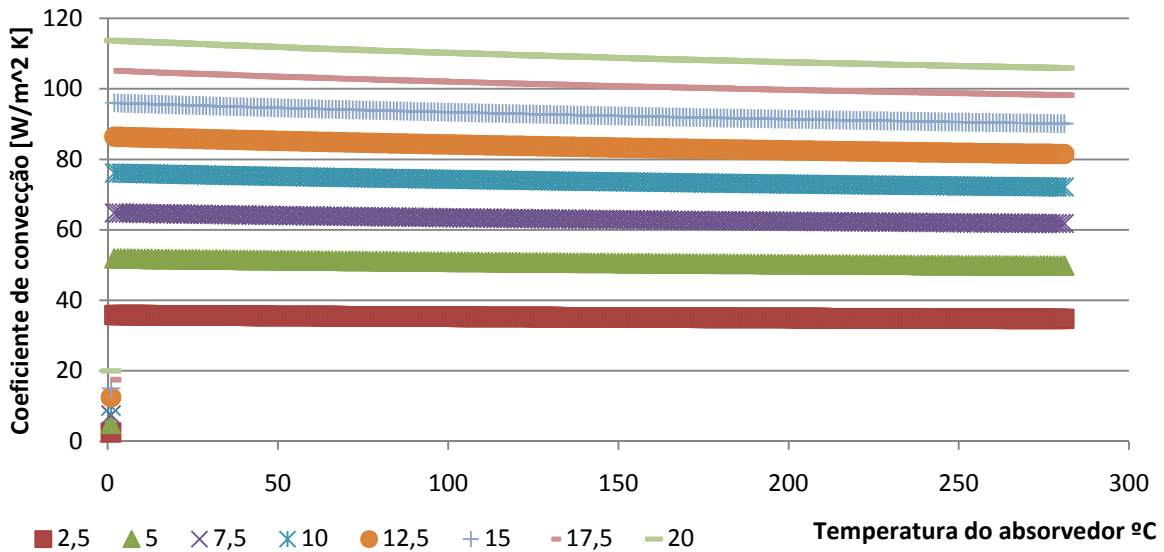


Figura 63 - Coeficiente de convecção na parte inferior para um escoamento incidente na perpendicular

Como é possível constatar os resultados para o escoamento incidente na perpendicular e na longitudinal são completamente diferentes. Tal acontece porque os escoamentos também são muito diferentes. No primeiro caso estamos a considerar um escoamento que a perturbação é mínima, como é o escoamento sobre uma placa o que acontece é que o escoamento começa laminar, só depois evoluindo para turbulento, mas não consideramos efeitos de descolamento, por isso as partículas seguem de forma mais ou menos ordenada, não provocando aumento da transferência de calor. No escoamento perpendicular o que acontece é que se regista um descolamento e neste caso surgem grandes perturbações no escoamento, havendo grande movimento das partículas aumentando por isso a transferência de calor.

Se atentarmos aos resultados, verificamos que para a parte superior, o coeficiente de convecção aumenta consideravelmente, cerca de 50% mais. Por exemplo para uma temperatura da superfície de cerca de 20°C e um regime de ventos de 12,5m/s temos no caso de um escoamento na longitudinal um coeficiente em torno de 30W/(m² K), enquanto que no caso de ser perpendicular sobe para valores em volta de 45 W/(m² K). No caso da parte inferior, o caso torna-se ainda mais grave tendo em conta que para o mesmo exemplo anterior o valor do coeficiente de convecção para incidência na perpendicular sobre para valores de cerca de 90 W/(m² K), ou seja, um aumento de 200%!

Como tem sido lema para este trabalho, tem-se considerado sempre a pior situação quando somos confrontados com várias soluções de modelação. Por isso, para a questão do coeficiente de convecção exterior seja para a parte inferior, seja para a superior foi considerado que o escoamento incidia na perpendicular. Na parte superior a questão não é tão importante visto que neste caso as temperaturas atingidas nunca serão tão elevadas como na parte inferior. Na parte inferior estão projectadas temperaturas muito elevadas, em torno de 250/270 °C, por isso as perdas para o exterior são muito importantes, sendo preferível maximiza-las numa primeira aproximação para depois corrigir a modelação numa fase posterior.

### 3.1.10. Equações da modelação para o absorvedor

Na modelação as perdas para o exterior pela parte superior e pela parte inferior estão de acordo com o que foi estudado até aqui. Passemos agora a apresentar as equações que regem a modelação, visto que toda a parte de considerações e estudo sobre a transferência de calor que não fosse simples já foi estudada.

Absorvedor:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{solar} &= \dot{Q}_{perdas\ radiac\tilde{a}o} + \dot{Q}_{condu\tilde{c}ao\ para\ 7} + \dot{Q}_{convec\tilde{c}ao\ interior} + \dot{Q}_{perdas\ convec\tilde{c}ao} \\ &= \dot{I} * A_{concentrador} * \rho_{concentrador} * \alpha_{absorvedor} \\ &= \varepsilon_{absorvedor} * A_{absorvedor} * \sigma * (T_3^4 - T_2^4) + \\ &+ \frac{\lambda_{cobre}}{(D_e + D_i)/2 * \pi/2} * L * \frac{D_e - D_i}{2} * (T_3 - T_7) + \\ &+ \alpha_4 A_4 (T_3 - T_5) + \alpha_3 A_3 (T_3 - T_2)\end{aligned}$$

O código da modelação é descrito em anexos, assim como a descrição do que significam as variáveis referidas.

### 3.1.11. Análise do depósito

A análise do depósito foi elaborada com outro grau de exigência, isto é, foi dedicado menos tempo, porque o depósito não era o objecto de estudo. A análise recairá sobretudo para a questão das perdas térmicas, visto que para a serpentina (onde é realizada a permuta de calor) foi considerado um rendimento de 50%.

Não foi realizada qualquer modelação do depósito considerando variação da temperatura, ou seja, considerou-se a temperatura no interior do depósito uniforme, sem estratificação. Na verdade, sabemos que tal não acontece, porque tendencialmente a temperatura mais elevada está na parte superior do tanque. De qualquer das formas, o que também foi feito foi uma análise da temperatura do tanque na parte inferior e na superior para que posteriormente sejam desenvolvidas correlações para a temperatura dentro do tanque e possam ser integradas na modelação.

Para a modelação do depósito o mais importante foi calcular as perdas para o exterior. Como o fornecedor não nos indicou nenhum valor típico para as perdas tínhamos três hipóteses:

- Considerar uma descida de temperatura do acumulador por unidade de tempo, por exemplo, 1°C em 2 horas. Esta é uma forma muito simplificada de abordar o problema acarretando problemas porque as perdas são independentes:
  - Da temperatura no interior
  - Da temperatura ambiente
  - Da diferença entre a temperatura do acumulador e a temperatura ambiente
  - Das condições atmosféricas (vento, temperatura do céu)



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

- Ponderar usar um coeficiente de perdas global para o exterior, mas neste caso continuávamos a considerar que as perdas não dependem:
  - Da temperatura interior
  - Da temperatura exterior
  - Das condições atmosféricas
- Calcular as perdas para o exterior, tendo em conta as características gerais do depósito, nomeadamente o isolamento. Desta forma levou-se em linha de conta:
  - A temperatura no exterior
  - A temperatura no interior
  - A diferença entre temperaturas
  - As condições atmosféricas

Foram desprezadas, no tanque, as perdas para o exterior por radiação, visto que a temperatura que a superfície exterior do tanque irá atingir será baixa. Esse nível de detalhe não é necessário, porque como já foi referido, o tema do trabalho não era o depósito, e não faria sentido calcular perdas para o exterior por radiação e não contabilizar a variação da temperatura dentro do tanque.

Também não foram considerados os ganhos energéticos da radiação solar. Neste caso, foi tomada (como anteriormente) a opção considerar a pior situação possível.

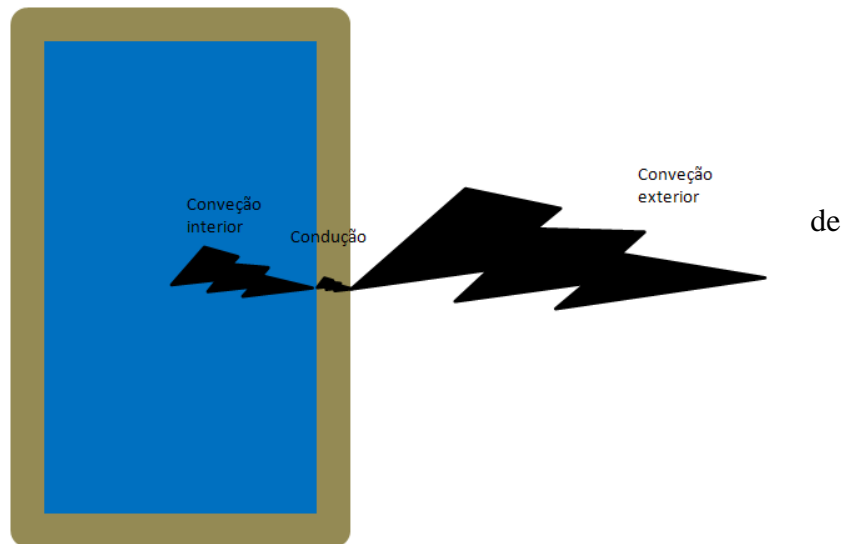


Figura 64 - Esquema de transferência de calor no acumulador

Para a convecção interior, tal como em outros exemplos anteriores, deveria ser feito um estudo com recurso a software específico para se calcular o coeficiente de convecção interior porque a geometria envolvida não é simples, não havendo por isso correlações na bibliografia. Foi feita uma análise para se saber que tipo de simplificação iria ser efectuada.

Primeiro pensou-se em considerar um coeficiente de convecção típico, mas desta forma o coeficiente seria independente da temperatura no interior, por isso admitiu-se que o escoamento seria do tipo livre sobre uma placa na vertical. Como sabemos tal não é verdade, porque existe interacção entre a convecção numa parede e na parede oposta, mas já se pode considerar uma boa aproximação. Claro que neste caso, a interferência causada pela serpentina foi desprezada, assim como o coeficiente de perdas nos topos foi considerado igual ao coeficiente na lateral.

Para este tipo de escoamentos, o EES apresenta-nos funções pré-definidas, pelo que bastou colocar as dimensões do tanque para se obter o resultado. Como as dimensões

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

interiores do tanque também não eram oferecidas, optou-se por estima-las com base na espessura do isolamento e na dimensão exterior.

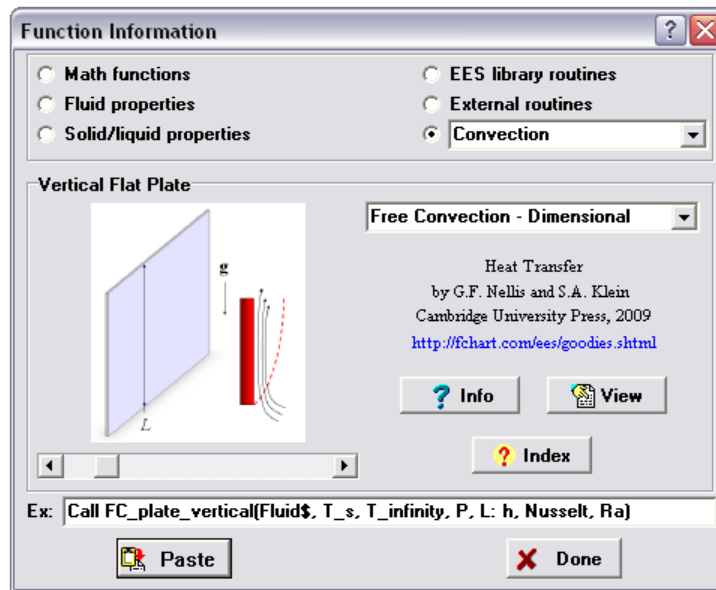


Figura 65 - Janela do EES para convecção livre numa placa na vertical

Quanto à condução basta referir que o isolamento usado é o poliuretano, sendo que bastou procurar as propriedades térmicas em livros de transferência de calor

Para a convecção exterior considerou-se o depósito um cilindro onde o vento incidia no perpendicular, porque como já vimos para o caso do absorvedor, esta é a situação mais desfavorável.

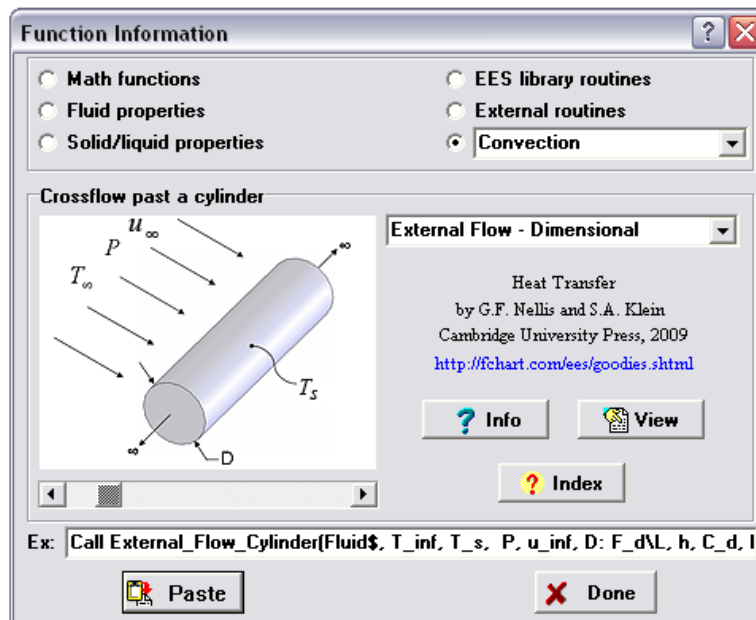


Figura 66 - Janela EES para convecção forçada em torno de um cilindro, com vento a incidir na perpendicular

Depois foi feito o balanço térmico no depósito

$$\dot{Q}_{conv\ int} = \dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv\ ext}$$

$$\alpha_{int}A_{int}(T_{dep} - T_{15}) = \frac{\lambda_{isol}}{\ln(D_e/D_i)}comprimento(T_{15} - T_{16}) = \alpha_{ext}A_{ext}(T_{16} - T_2)$$

### 3.2 Construção do protótipo

Como a experiência de construção era bastante reduzida, o orientador auxiliou na construção do primeiro protótipo, mas aqui se percebeu a importância deste tipo de estágio para que o aluno fique com a noção da dificuldade de construção de um protótipo.

Para começar fez-se um desenho em cada 3D.

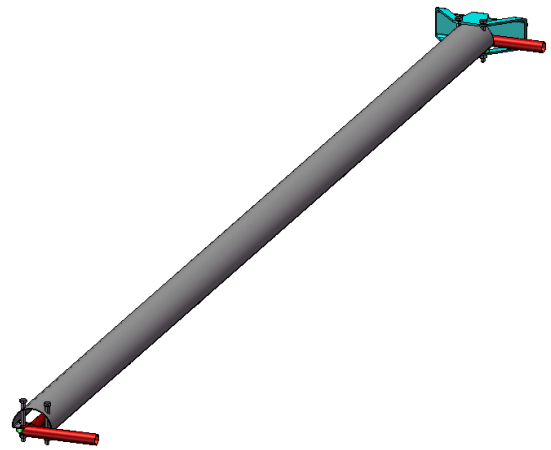


Figura 67 - 3D do absorvedor

O grande problema prendia-se com a fixação do isolamento com o tubo de circulação. Numa primeira fase pensou-se em soldar fixações ao tubo que depois seriam rebitadas na protecção de alumínio do isolamento.



Figura 68 - Fixação projectada entre isolamento e tubo

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Esta solução apresentava o inconveniente se serem necessárias várias soldaduras por brasagem, pelo que se optou por construir algo diferente. Neste caso soldou-se uma peça inteira na parte superior do tubo, onde foram feitos apenas 4 pontos de soldadura. Desta forma aumentou-se também a rigidez do tubo à flexão.

Posteriormente, bastou furar o reforço de forma a que com parafusos e porcas se pudesse fixar a protecção do isolamento. Foi difícil conseguir um tubo de alumínio e corta-lo ao centro, por isso optou-se por colocar um rectângulo a proteger o isolamento. O resultado final é o que se pode ver na figura 69.



Figura 69 - Protótipo 1

Como podemos observar, o aspecto geral do absorvedor é bastante diferente do projectado. Tal deveu-se à inexperiência de protótipagem, porque existem muitas soluções que são fáceis de desenhar em programas de CAD mas são difíceis de implementar. Com este protótipo, conseguiu-se ter a noção do trabalho que dá construir um protótipo e das dificuldades inerente à sua construção. Nos protótipos seguintes começou a pensar-se casa vez mais no processo de produção.

De qualquer das formas, é de referir que salvo uma ou outra excepção, apesar do protótipo ser bastante diferente do projecto, a verdade é que os princípios do protótipo foram respeitados. O único problema existente no protótipo é o facto de a área superior não ficar totalmente isolada, mas como é possível ver depois em imagens do sistema em funcionamento, isso não se revela de muita importância.

Outro aspecto importante neste processo todo foi a questão relacionada com a modelação. De facto, na modelação é importante tentar simplificar o máximo possível, desde que não ponha em causa o resultado final. E por aqui podemos tirar a conclusão que não é importante tentar fazer por exemplo uma modelação num software de mecânica dos fluidos para achar o coeficiente de convecção em torno de uma geometria complexa (absorvedor) quando no final o protótipo construído apresenta algumas falhas em relação ao projectado.

### 3.3 Dimensões

Neste subcapítulo serão apresentados os desenhos com as dimensões gerais do colector.

#### 3.3.1 Concentrador

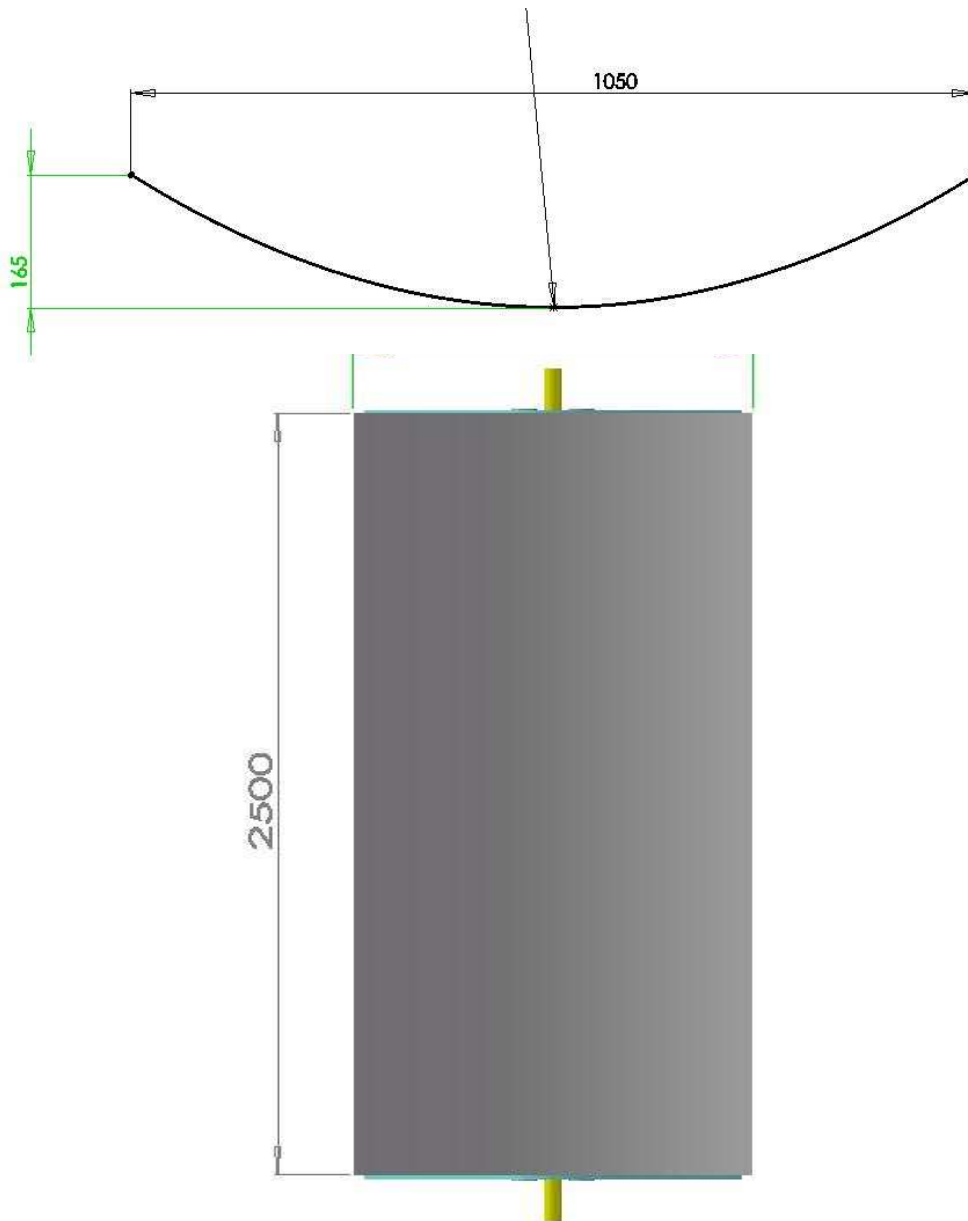


Figura 70 - Geometria do concentrador

A equação da parábola deste protótipo (parábola que já estava definida inicialmente) é:

$$y = 0,6x^2$$

### 3.3.2 Absorvedor

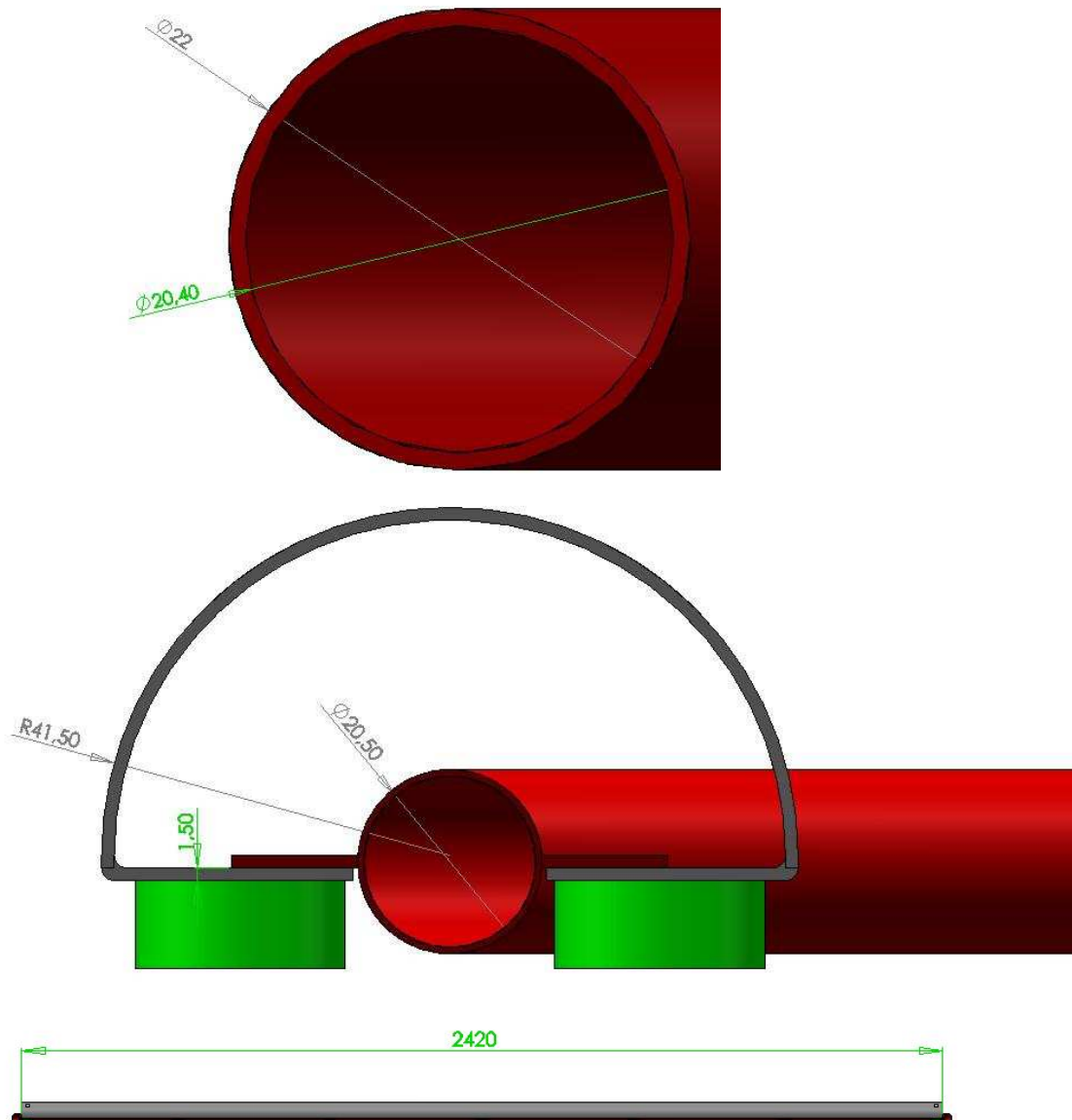


Figura 71 - Dimensões gerais do absorvedor

Tendo em conta as dimensões do absorvedor e do concentrador podemos definir a razão de concentração.

Área de concentração:

$$A_A \approx 1,05 * 2,42$$

Área de absorção:

$$A_a = 0,022 * 2,42$$

Razão de concentração:

$$RC = \frac{A_A}{A_a} = \frac{1,05 * 2,42}{0,022 * 2,42} \approx 48$$

### 3.4 Instalação

Neste subcapítulo será apresentado o esquema da instalação, onde se procura dar enfoque ao local onde se encontrava o equipamento.

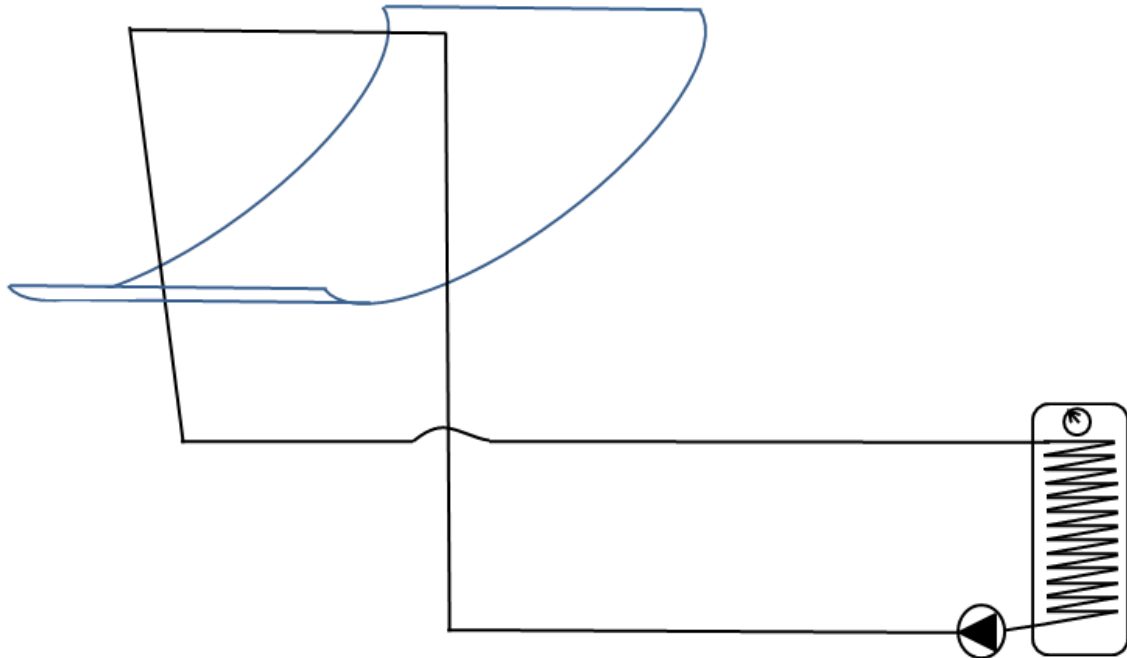


Figura 72 - Esquema da instalação do protótipo 1

Nesta altura apenas havia um termómetro, o que estava no acumulador, e a bomba estava logo à saída do acumulador. A permuta de calor no tanque é feita através de uma serpentina.

### 3.5 Resultados da modelo teórico e experimental

Os primeiros resultados foram tirados tendo em conta a hora do dia que ocorreram, assim como temperatura e vento previsto no site do instituto nacional de meteorologia.

Inicialmente não existia nenhum pireliómetro ou pelo menos um piranómetro, pelo que apenas foi possível comparar se o colector estava a funcionar em boas condições, e comparar com a modelação. Não sendo possível calcular o rendimento, ou melhor, o rendimento foi calculado para um valor referência de radiação solar.

Tabela 4 - Modelação protótipo 1

Hora	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30
T_dep	25,00	29,12	33,20	37,22	41,19	45,10	48,97	52,79	56,55	60,27
Hora	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30
T_dep	63,94	67,55	71,12	74,64	78,11	81,53	84,90	88,20	91,26	94,01

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Na prática foram obtidos resultados completamente díspares.

Tabela 5- Resultados primeiro protótipo

Hora	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30
T_dep	20,00	21,00	22,00	25,00	24,00	25,00	28,00	30,00	29,00	28,00
Hora	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30
T_dep	30,00	31,00	32,00	32,00	31,00	31,00	30,00	30,00	29,00	29,00

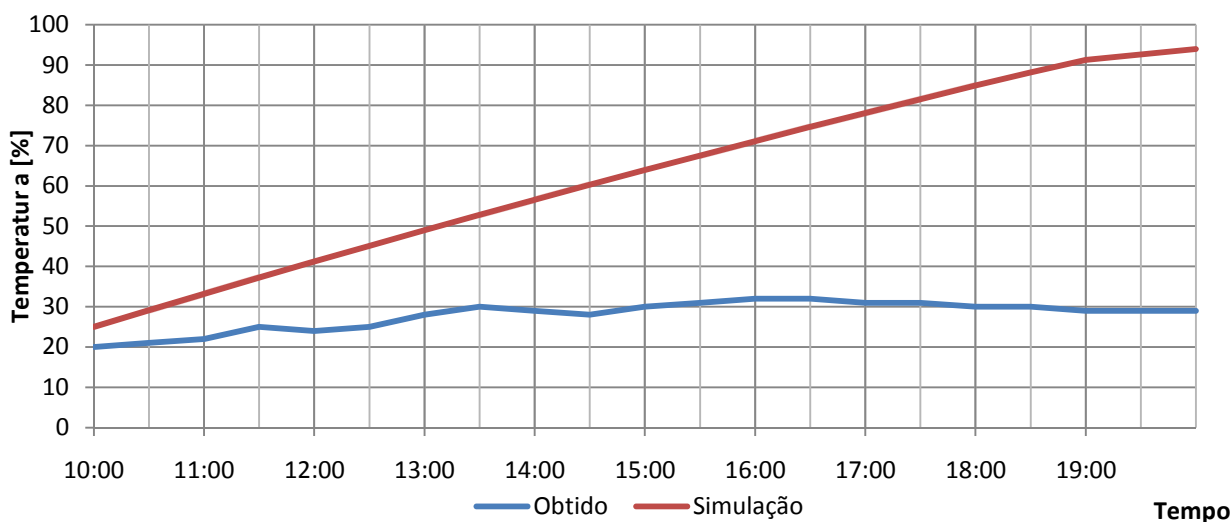


Figura 73 - Comparação entre resultados experimentais e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 1

### 3.6 Conclusões

Foi, então, necessário proceder uma avaliação ao que estava a acontecer de errado. Numa primeira análise, foi colocada a hipótese de o absorvedor não ter sido colocado no local do foco. Desta forma, começou a analisar-se o foco com auxílio de uma peça pintada de preto. Desta maneira, seria perfeitamente visível o local onde o foco estava a ocorrer. Nessa altura, chegou-se à conclusão que a parábola tinha algum problema na concepção porque na realidade ela não concentrava a radiação num ponto. Para além de no geral a parábola não concentrar a radiação toda num único ponto, havia locais onde por existirem amolgadelas e imperfeições, não existia o mínimo de radiação a incidir no absorvedor. Como podemos ver nos resultados, a partir da 6ª hora a temperatura no depósito baixa de forma consistente, tal deve-se ao facto de a posição do sol já se encontrar tão baixa que o Tracking da parábola é incapaz de acompanhar. Tal situação será corrigida nos protótipos de pré-série.

Não foram calculados rendimentos para a parábola porque como não existia uma concentração da radiação, o resultado só podia ser mau, pelo que não fazia sentido calcular rendimento do equipamento.



## 4. Protótipo 2

Depois de serem analisados os resultados do primeiro protótipo, chegou-se à conclusão da necessidade de encomendar material para o concentrador. Porém, e tendo em conta que o fornecedor tinha prazos de entrega relativamente alargados e que as temperaturas que estavam a ser atingidas eram baixas, decidiu-se construir um absorvedor de um único tubo, sem isolamento da parte superior. Neste caso, era mais fácil perceber onde devia estar o foco e colocar o absorvedor em posição. Para além disso, era mais benéfico de usar porque não estava a ser atingida a temperatura crítica.

De referir que, inicialmente o estágio estava a ser concretizado na sede da MARTIFER, em Oliveira de Frades. Com o decorrer deste trabalho, a ENER-Q mudou de instalações para a cidade do Porto. O protótipo encontrava-se na sede, pelo que foi necessário proceder à desmontagem do mesmo, e montagem no novo local.



Figura 74 - Protótipo em Oliveira de Frades

Como nas novas instalações não existia um laboratório de testes com fácil instalação (como no local onde estava), foi necessário conceber um sistema de suporte do colector, e instalá-lo. De referir que existiram alguns problemas no Tracking porque durante a viagem, algumas ligações foram desconectadas, fazendo com que os sensores de luminosidade deixassem de funcionar correctamente.

Nesta altura instalaram-se também dois termómetros no sistema hidráulico, um no tubo de entrada no colector e outro na saída para se conhecer as temperaturas respectivas. Desta forma é mais fácil perceber o funcionamento quer do colector quer do permutador do depósito.



#### 4.1. Modelação

Para a modelação, bastou alterar a análise ao absorvedor, tendo em conta que tudo o resto se manteve igual. Para começar, eliminou-se o isolamento, pelo que não faz mais sentido falar no ponto 14, ponto no isolamento.

Nesta situação estava em causa se iríamos considerar que o ponto 7 estava a uma temperatura diferente do ponto 3 ou, se por ter sido retirado o isolamento, seria correcto considerar os pontos à mesma temperatura.

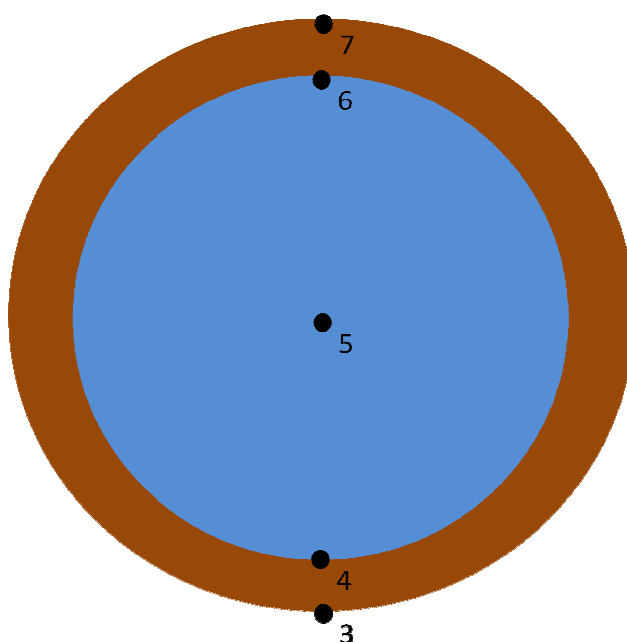


Figura 76 - Pontos do absorvedor

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Como o programa para o protótipo 1 já estava construído, optou-se pela abordagem mais correcta que foi considerar que os pontos 7 e 3 estavam a temperaturas diferentes

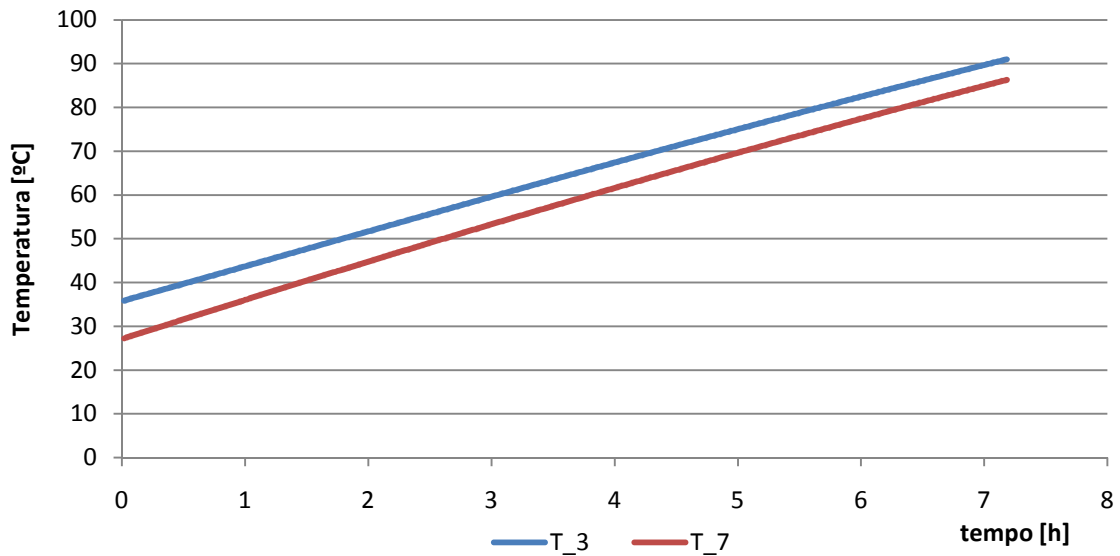


Figura 77 - Modelação da evolução das temperaturas em 3 e 4 para o protótipo 1

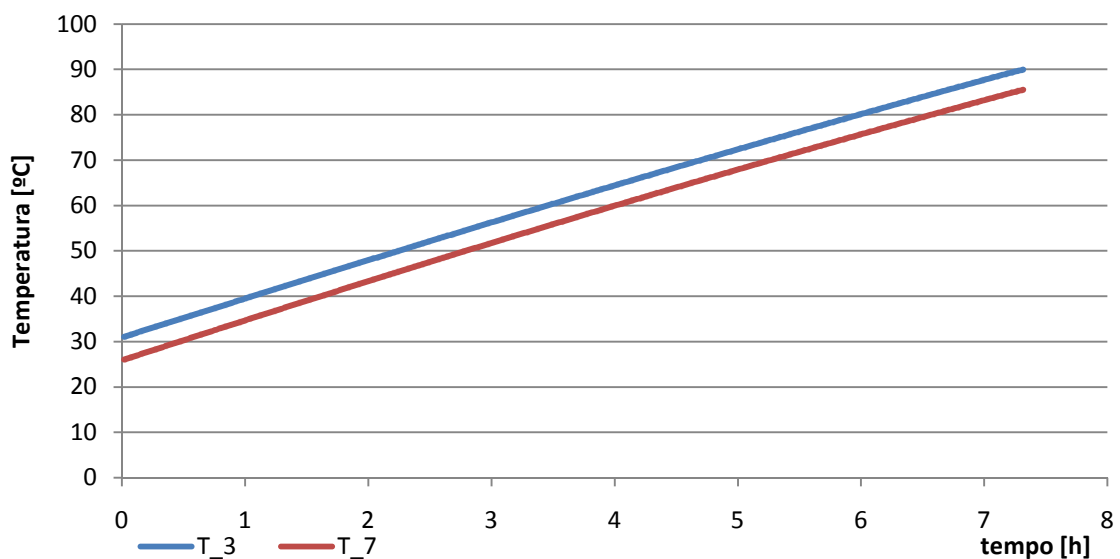


Figura 78 - Modelação da evolução das temperaturas em 3 e 7 para o protótipo 2

Como se pode observar é útil considerar temperaturas diferentes nos dois pontos porque a diferença de temperatura não é de todo desprezável. Aliás, para temperaturas perto dos 90°C, a diferença entre a temperatura em 3 e 7 é muito semelhante, quer para a modelação do protótipo 1 quer para o protótipo 2.

A nível da construção, pouco há a acrescentar, na medida em que o trabalho realizado foi apenas cortar um simples tubo e soldar acessórios nas extremidades de forma e ser possível conectar o tubo corrugado. As dimensões gerais são iguais às apresentadas anteriormente.

## 4.2. Instalação

Neste protótipo introduziu-se os termómetros à entrada e saída do colector. Na verdade, os termómetros foram colocados logo à saída do acumulador. Existe um erro associado a esta prática, que tem a ver com o facto de estarmos a considerar as perdas da ligação para o rendimento do equipamento.

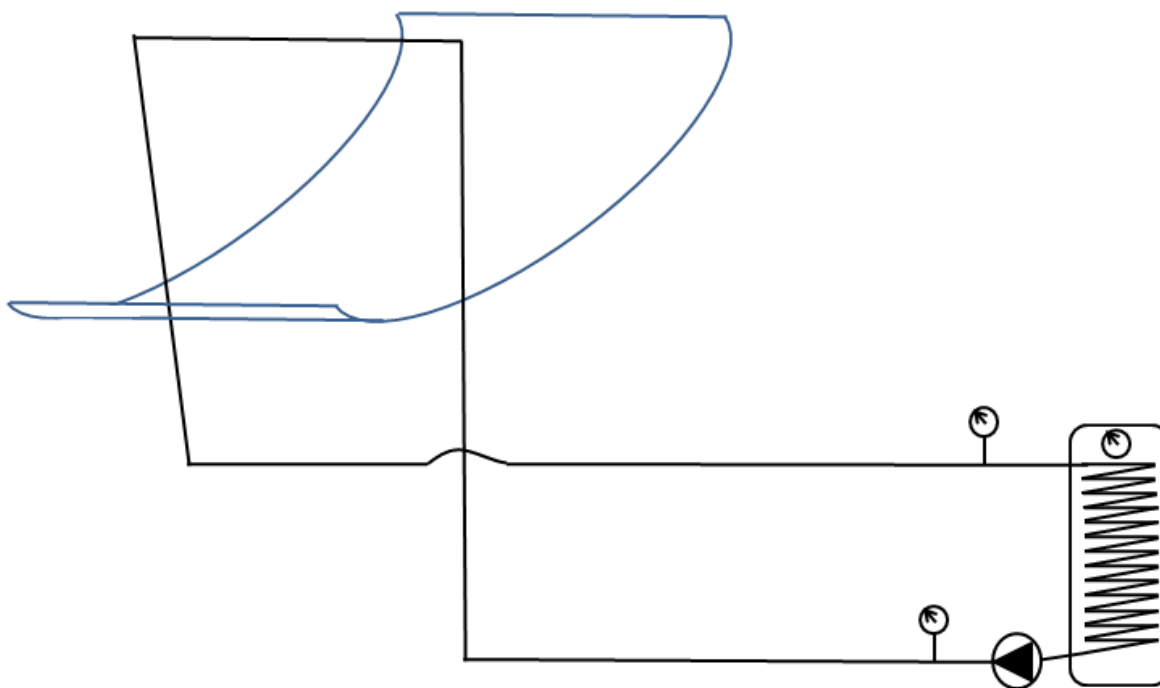


Figura 79 - Esquema da instalação do protótipo 1

## 4.3. Resultados da modelo teórico e experimental

Os resultados, como era de esperar, não foram significativamente diferentes, o que vem comprovar que o grande problema nesta altura estava no concentrador e não no absorvedor, tal como era especulado.

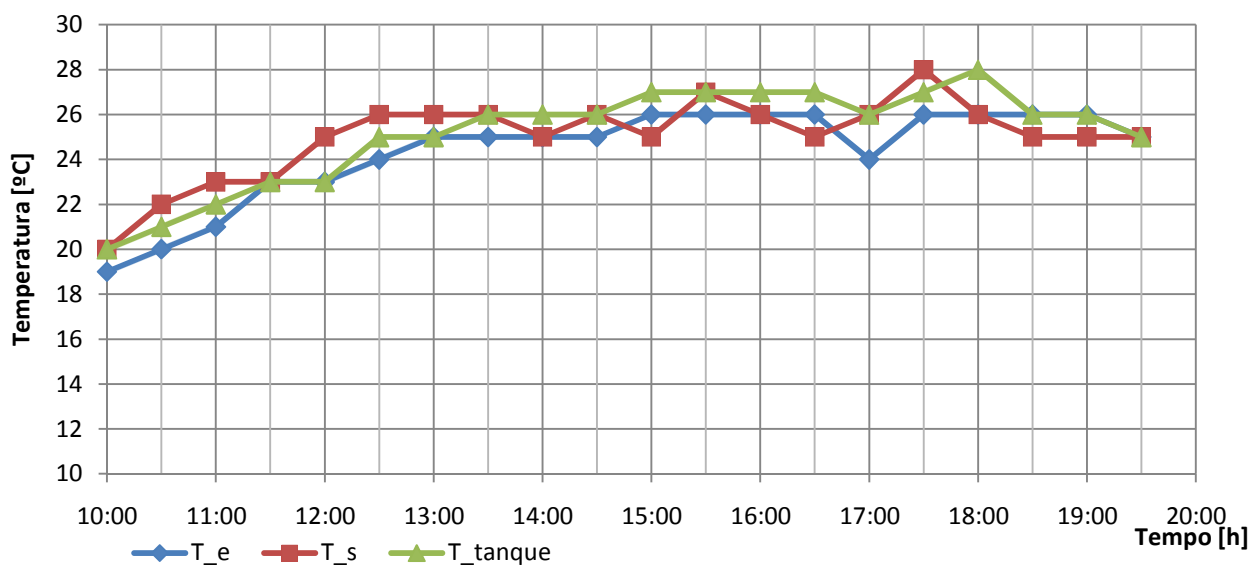


Figura 80 - Evolução das temperaturas durante o teste ao protótipo 2

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Ao contrário do protótipo anterior, conseguiu-se desta vez chegar até às 19h com captação de energia solar. Isto deveu-se ao facto de o ter modificado no sentido de permitir que o curso disponível para o motor que modifica a altura do concentrador aumentasse. Por outro lado, nesta altura, a altura do sol àquela hora é também ela superior aos primeiros testes, porque o primeiro teste foi efectuado em meados de Março e este para meados de Abril.

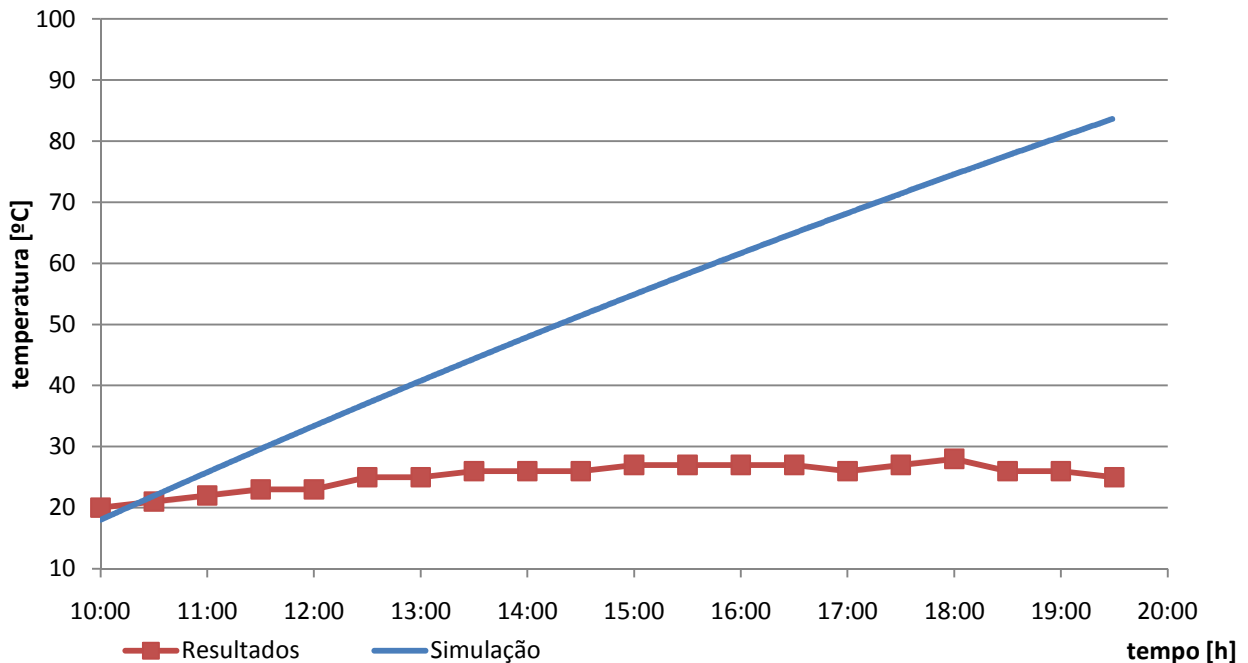


Figura 81 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 2

### 4.4. Conclusões

Como era previsto já com o protótipo anterior, o problema principal do colector residia no concentrador. Podemos também concluir que devido à altura do suporte do mesmo, a parábola revela alguma instabilidade (efeitos do vento), pelo que aproveitando o facto de ser necessário construir um novo concentrador, então é seguro tentar colocar o protótipo o mais próximo possível do chão no sentido de baixar o centro de gravidade.

Para além dos aspectos a melhorar no colector no sentido de melhorar as performances do mesmo algumas alterações de nível técnico deverão ser efectuadas.



## 5. Protótipo 3

No seguimento das conclusões tiradas no protótipo anterior procedeu-se a grandes alterações no colector. A nível de modelação pouco foi alterado, sendo que a única alteração considerada foi o facto de se passar a usar alumínio polido em vez de aço inoxidável.

Muito mais importante neste caso é o processo de construção da parábola, por isso esse assunto será o mais abordado.

### 5.1. Construção

Para a construção foi necessário começar a procurar fornecedores de chapas de alumínio reflectoras. Para isso contactaram-se alguns fabricantes no sentido de obter informações. Numa primeira fase foi encomendada uma amostra com 3 chapas de alumínio à Alucenter, mas foram estudados 2 outros fabricantes, nomeadamente a Alanod e a almeco.

A chapa usada tinha as seguintes características:

- Alumínio polido;
- 0,4mm de espessura;
- Reflectividade:
  - Difusa=6%;
  - Especular a 60° longitudinal=81%;
  - Especular a 60° transversal=82%;
  - Total=87%.

		C/Paris, 1-7 Nave 22 - Pol. Ind. Cova Solera - 08191 RUBI (Barcelona) Tel.: 935 888 338 - Fax: 935 888 072 E-mail: alucenter@alucenter.es	
		ATENCION: PARA CUALQUIER RECLAMACION HACE FALTA ESTA ETIQUETA. ESTA MERCANCIA NO SE PUEDE MOJAR, EL MATERIAL SALE CON EL EMBALAJE EN PERFECTAS CONDICIONES, CUALQUIER DAÑO QUE OBSERVE HAGALO CONSTAR AL FIRMAR EL ALBARAN	
DESTINATARIO :		MARTIFER ENERGIA	
POBLACION :		PORTUGAL	
MATERIAL :		BRILLO ESPEJO	CH
MEDIDAS 1 :	2500 X 1250 X 0.4	3	FECHA
MEDIDAS 2 :			15-4-09 9:28
MEDIDAS 3 :			Su Pedido :
MEDIDAS 4 :			LOTE :
MEDIDAS 5 :			69627
PESO:		TOTAL :	3 / 3

Figura 82 - Chapa em alumínio da Alucenter

A parte principal para a construção da parábola residia em como iria ser construída. A parábola que lá se encontrava tinha vários defeitos na construção, pelo que não existia concentração da radiação num ponto.

Pensou-se inicialmente em construir a parábola fora e depois instala-la no colector, o problema é que a espessura da chapa é pequena, o que torna o material muito frágil. Por isso, como já tínhamos uma parábola instalada pensou-se em colocar a nova parábola sobre a mais antiga.



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Se o problema fosse apenas o material da parábola inicial, a nova poderia ser colada em cima da antiga. Porém como a antiga tinha graves problemas na construção, então começou-se a pensar numa maneira de a construir.

Chegou-se então à conclusão de construir peças de madeira para fixar na parábola antiga e colocar a nova por cima. As peças seriam feitas numa máquina de comando numérico e, por isso, a precisão na construção das mesmas era bastante grande.



Figura 83 - Peças projectadas

Depois de construídas, foi necessário colocar na parábola antiga. Como esta não estava bem construída, era necessário garantir que a má construção desta não afectaria a nova.

Por isso, foi necessário nivelar todas as peças de madeira para ficarem todas iguais. A fixação teria de ser flexível na parte da montagem, mas depois mostrar-se resistente. Por isso, optou-se por fixar as peças de madeira à antiga parábola recorrendo à silicone.

Para garantir que a nova parábola ficava o melhor construída possível, construíram-se, também, contra-moldes de forma que garantiram a correcta construção da parábola.



Figura 84 - Fixação dos moldes para construção da parábola e contra-moldes



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Depois, seguiu-se o trabalho de construção da parábola que aparece descrito nas imagens seguintes.



Figura 85 - Construção da nova parábola e pormenores de fixação

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Antes de instalar a parábola decidiu-se colocar o suporte da mesma mais baixo de forma a não existir tanta instabilidade. Para além disso resolveu-se fazer uma revisão geral a motores e sistemas de rótulas de forma a harmonizar o movimento, aplicando massa lubrificante e lixando as superfícies onde se dá o escorregamento.

Posteriormente, instalou-se o concentrador e o absorvedor de apenas um tubo, para ser mais fácil perceber se a radiação solar estava a concentrar numa linha ou não.

Logo que se começou a testar, percebeu-se que o desempenho tinha subido significativamente, porque a radiação estava a concentrar-se muito melhor, apesar de o concentrador ainda apresentar alguns problemas na construção, nomeadamente porque a quantidade de peças de madeira usada foi relativamente pequena, por isso apareceu um fenómeno semelhante ao que acontece nas capotas de lona nos automóveis, isto é um vinco no local onde estava a madeira e depois uma ligeira concavidade nos interstícios.



Figura 86 - Defeitos no concentrador do protótipo 3 (defeito tipo tolde)

De referir que nenhuma alteração foi feita na instalação, pelo que o esquema do protótipo anterior se mantém válido.

## 5.2. Dimensões

Neste protótipo apenas o concentrador foi alterado, sendo o absorvedor, um tubo de cobre com os diâmetros anteriormente descritos, 22mm externo e cerca de 20,4 interior. Para o concentrador as dimensões gerais são apresentadas de seguida.

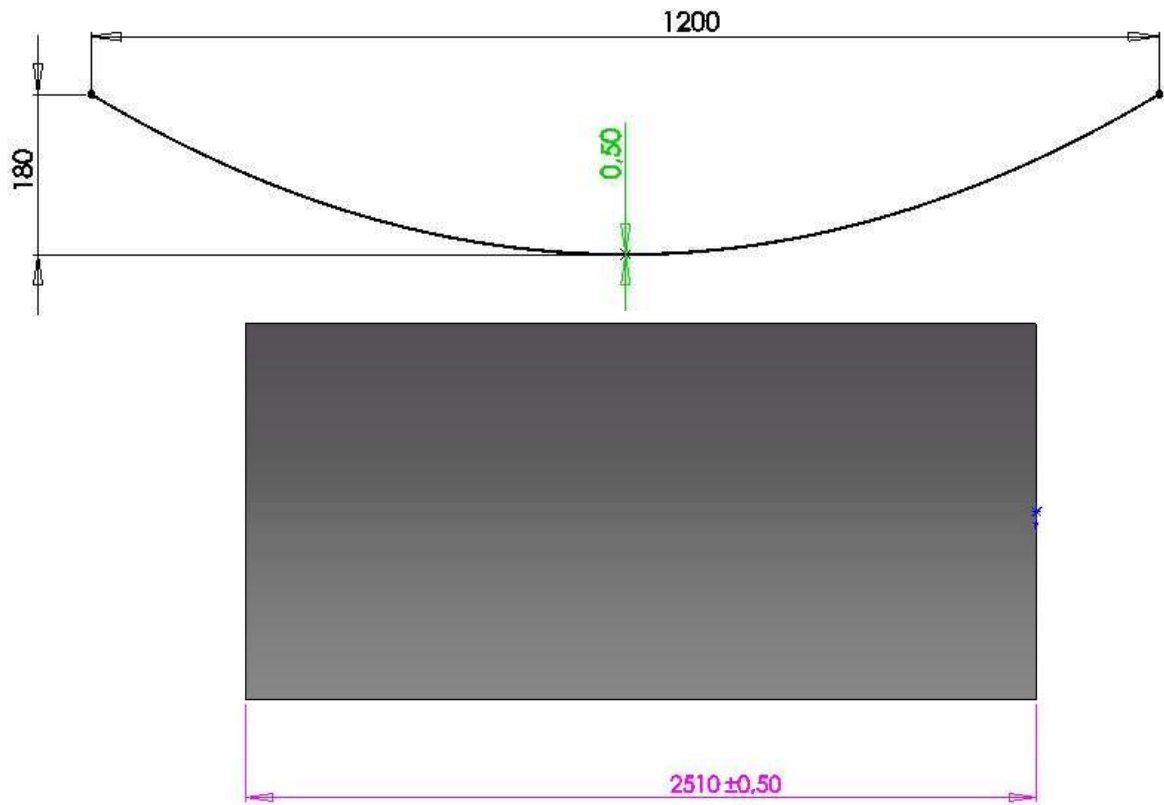


Figura 87 - Dimensões gerais do concentrador do protótipo 3

Neste caso, construiu-se o concentrador com uma nova geometria da parábola, sendo neste caso:

$$y = 0,5x^2$$

Como a chapa tinha dimensões diferentes, a razão de concentração também foi alterada, passando neste caso a ser

$$RC = \frac{A_A}{A_a} = \frac{1,2 * 2,42}{0,022 * 2,42} \approx 55$$

### 5.3. Resultados da modelo teórico e experimental

Como não tínhamos disponível um piréliometro para leitura da radiação solar directa, continuamos sem poder calcular o rendimento do equipamento. Bastando-nos por isso recolher o maior número de dados, dentro do possível claro.

Os resultados obtidos foram muito animadores, no sentido em que para uma radiação directa incidente de  $800\text{W/m}^2$ , a evolução da temperatura do tanque, registada foi muito semelhante ao esperado.

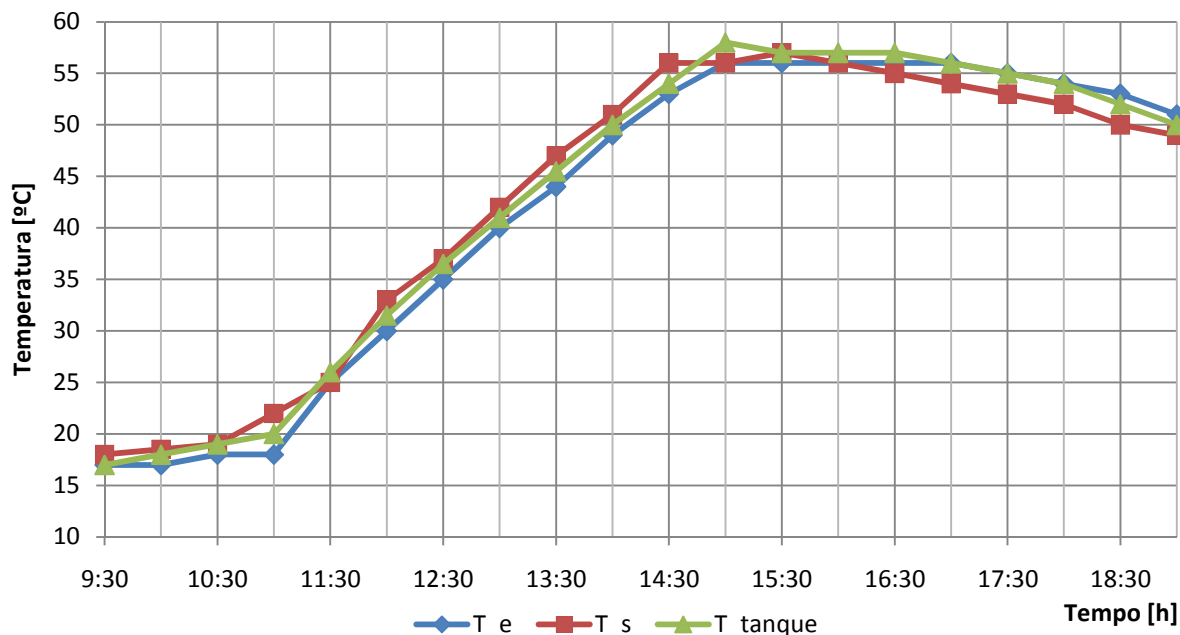


Figura 88 - Evolução das temperaturas durante o teste ao protótipo 3

Como podemos ver, a partir das 15:30, a temperatura no tanque deixou de aumentar. Tal deveu-se a um problema num motor no sistema de Tracking, o que aconteceu foi que no sistema de redução do motor que faz o Tracking do azimuth (que não tinha sido lubrificado) partiu-se uma cavilha, ficando o sistema em roda livre.

O sistema foi reparado, mas como teve de ser feita paragem dos testes decidiu-se então evoluir para o protótipo 4, como será explicado adiante.

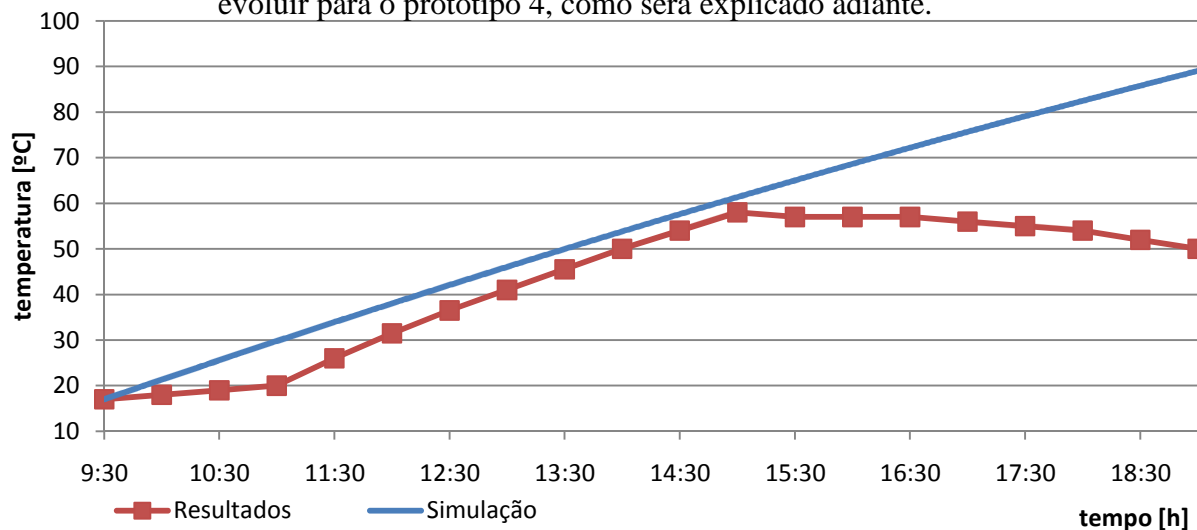


Figura 89 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 3

#### **5.4. Conclusões**

Como seria de esperar, com a construção de um novo concentrador, o desempenho do colector evoluiu para valores já aceitáveis. Porém suspeita-se de alguns problemas com o colector como:

- Sistema de Tracking que necessita de ser afinado,
- Tanque demasiado pequeno para teste até 100°C porque pode atingir com facilidade esse valor,
- Ausência de controlo da bomba de circulação,
- Concentrador ainda sofre de alguns problemas construtivos, porque a concentração solar é bastante melhor do que anteriormente, mais ainda pode ser memorável,
- Chapa reflectora com características melhoráveis,
- Ausência de sistema de monitorização do valor da radiação directa incidente.

Desta forma decidiu-se passar por montar novamente o protótipo do absorvedor inicial, e um tanque de maiores dimensões para poder trabalhar durante vários dias sem ser necessário retirar ou arrefecer a água, para estudar também o comportamento do tanque durante a noite, isto é, estudar perdas de calor para o exterior no período mais crítico, a noite.





## 6. Protótipo 4

No protótipo 4 passou a usar-se um tanque de maiores dimensões e o de menores dimensões, podendo então obter dois resultados e consequentemente aumentar a informação que podemos extrair do equipamento. Foi feita limpeza da parábola e reajuste dos sensores de Tracking no sentido de tornar o Tracking mais eficiente. Como a parábola já estava em melhores condições começou a pensar-se na melhor maneira de implementar a solução do tubo de vidro.

### 6.1. Modelação

Neste protótipo nada foi feito nos principais componentes, isto é, o concentrador e o absorvedor já foram usados anteriormente, por isso toda a parte de modelação referente a estes equipamentos foi mantida.

A parte de modelação mais trabalhada foi o depósito, onde se operou as seguintes alterações:

- Construiu-se uma modelação paralela para 150l e 500l,
- Uma nova curva da bomba para o acumulador de 500l, porque a bomba é diferente,
- Sistema sem serpentina,
- Novas dimensões para o depósito de 500l.

O depósito de 500l do fabricante Elbi, foi estudado a nível de isolamento e de dimensões para poder ser introduzidos os dados na modelação. Acoplado ao depósito colocamos um novo grupo hidráulico, com uma nova bomba. O grupo hidráulico tinha também um transdutor de caudal (rotâmetro) algumas válvulas de corte e termómetros e válvulas anti-retorno.

A serpentina foi retirada, ou seja, o fluído de aquecimento no colector passou a ser o mesmo do depósito do acumulador, porque a serpentina a altas temperaturas começa a ter uma performance bastante baixa. Para além disso, é mais fácil simular porque é menos um elemento para estudar. Como anteriormente o comportamento da serpentina tinha sido só muito superficialmente abordado, decidiu-se tirar e tornar o teste mais fiável.

Outro aspecto que o novo acumulador tem é o facto de ter dois termómetros, deste modo pode tirar-se valores de temperatura na parte superior e inferior de forma a mais tarde poder desenvolver-se uma correlação para a estratificação da temperatura.

Para o cálculo do caudal que circula passou a estudar-se a curva da bomba, para isso bastou ir ao site da Wilo e retirar a informação referente a essa bomba. Com o gráfico da bomba foi feito o mesmo trabalho que para a bomba do acumulador de 150l.

Como anteriormente, depois foi feito um teste à circulação da bomba, medindo o caudal através de um recipiente e de um cronómetro.

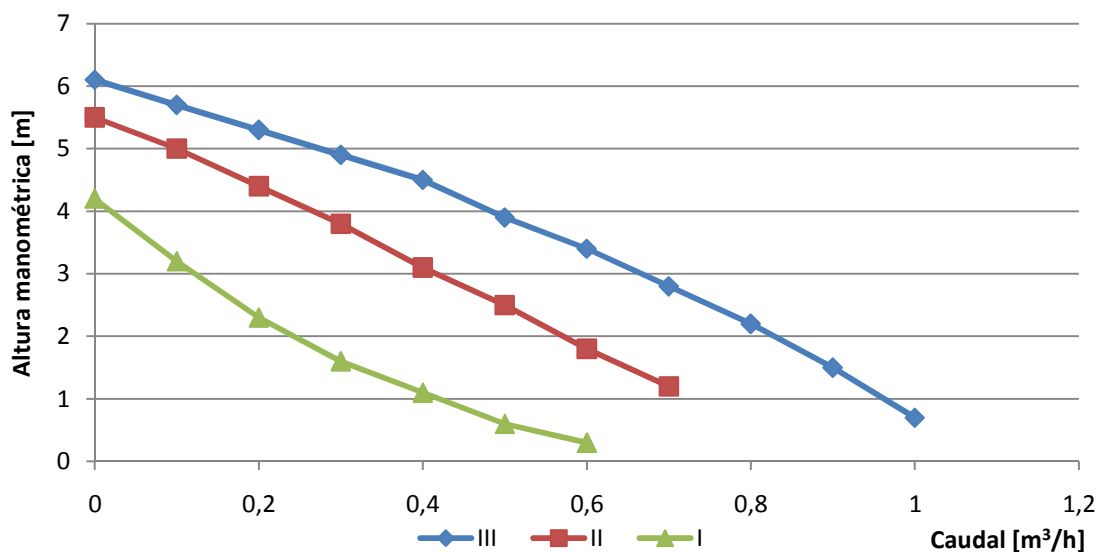


Figura 90 - Curva da bomba Wilo

Depois através de uma aproximação polinomial (de 3º grau) retirou-se as equações da bomba para várias velocidades de rotação.

$$H = -2,78Q^3 + 9,52Q^2 - 11,23Q + 4,21 \quad \text{para posição 1}$$

$$H = 4,12Q^3 - 5,13Q^2 - 4,54Q + 5,50 \quad \text{para posição 2}$$

$$H = -0,95Q^3 - 0,74Q^2 - 3,69Q + 6,09 \quad \text{para posição 3}$$

Para a velocidade I a modelação indica um caudal de cerca de 0,096 kg/s, mas pelos ensaios efectuados, o caudal circulante é significativamente maior, cerca de 0,124kg/s, sendo que grande parte do problema deverá estar na dimensão e nas características do tubo corrugado. Tentou-se obter mais informações sobre o tubo corrugado de forma a melhorar a modelação. Alterando a largura do tubo e a rugosidade chegou-se a valores mais consensuais, cerca de 0,115 kg/s. Foi com estas características que foi efectuada a modelação.

Depois na modelação do comportamento do acumulador (perdas para o exterior) bastou alterar as dimensões do novo acumulador.

## 6.2. Construção

Na construção é necessário referir que foi necessário instalar o novo acumulador e fazer todas as ligações hidráulicas. Nas fotografias já é possível verificar o aspecto que ficou o colector depois de se encurtar o suporte. De resto, não existiu nenhum trabalho na construção. A geometria está por isso também definida.

De referir que o Tracking da parábola estava com problemas, porque acontecia é que durante o tempo que o sol estava mais baixo (amanhecer e anoitecer) a parábola tendia a estar mais alta do que devia. Nesta altura pensou-se que seria do posicionamento dos sensores de altura não estar no melhor local, e por isso passou-se a colocá-los junto da parábola.



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico



Figura 91 - Novo posicionamento dos sensores do Tracking da altura do sol

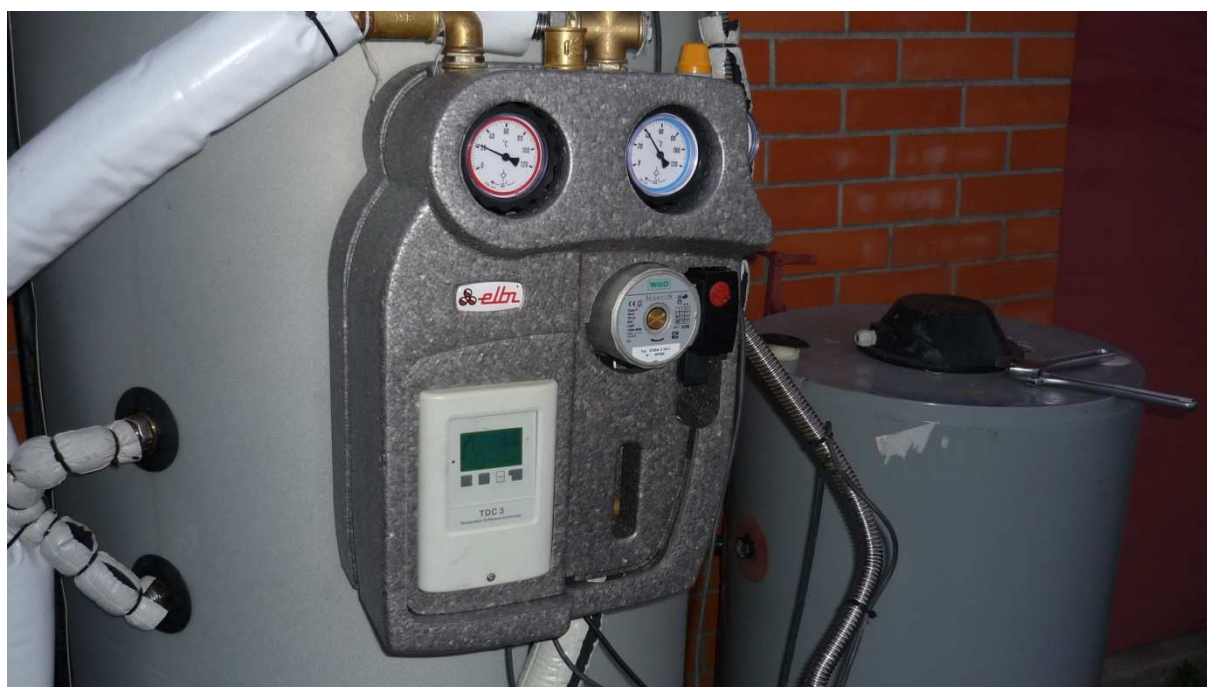


Figura 92 - Novo grupo hidráulico

### 6.3. Instalação

Nesta altura foi colocado na instalação medidor de caudal (que devido a pouca precisão, acabou por nunca ser usado), o acumulador e o piranómetro.

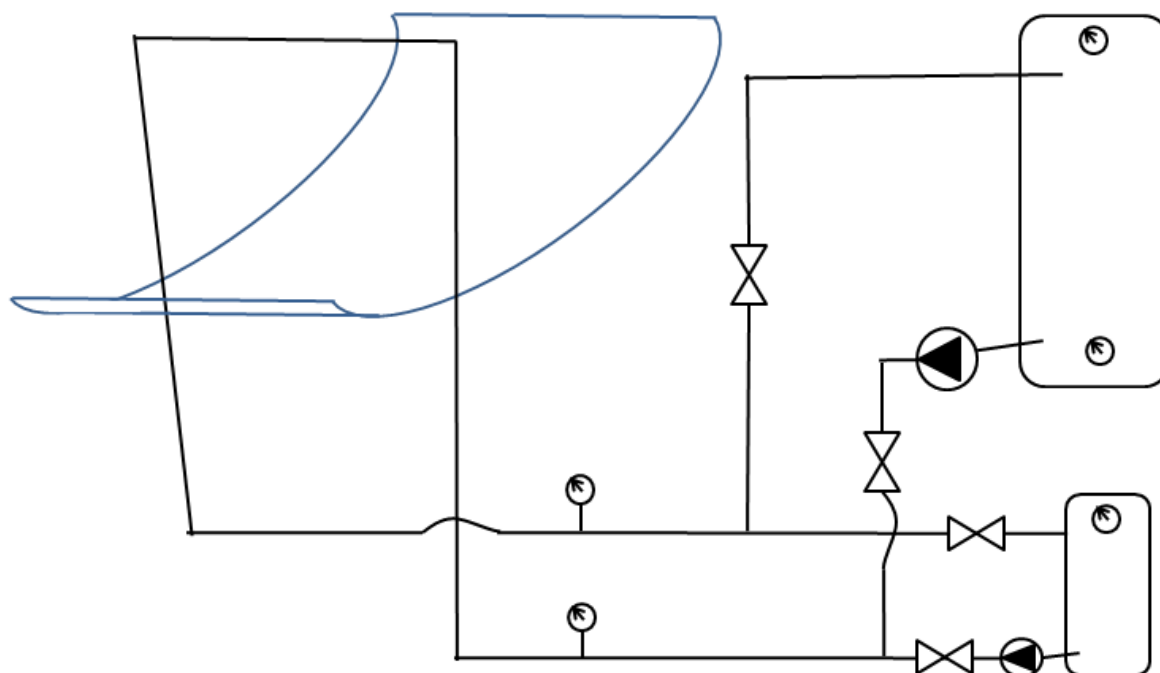


Figura 93 - Instalação do protótipo 4

Os termómetros foram colocados um pouco mais afastados do acumulador, porque da maneira que estavam, eram afectados pela temperatura a que este estava (contacto).

Como já foi referido, a permuta nos tanques passou a ser directa, isto é, anulou-se a resistência.

De notar a presença dos dois termómetros no acumulador de 500l, um na parte superior, outro na inferior. Estes transdutores permitiram no futuro encontrar uma correlação para a estratificação no depósito. Neste momento, não faz muito sentido desenvolver essa correlação, na medida em que a permuta é directa enquanto posteriormente terá de ser usado um permutador, interno ou externo. Se o permutador for interno existe influência bastante grande na estratificação.

### 6.4. Correlação para radiação directa

Existem várias correlações para relacionar a radiação global lida na horizontal com a radiação directa. De todas correlações existentes apenas duas serão estudadas, a presente no livro “Active Solar Collectors and their Applications” do Rabl, que serviu de referência para este trabalho e a presente no livro do Dufie and Beckman “Solar Engineering of Thermal Process”.

### 6.4.1. Correlação segundo Rabl

A correlação do Rabl relaciona directamente a radiação solar total com a radiação directa.

Começemos por calcular as variáveis que são usadas para a correlação. A primeira variável importante é  $I_{0,eff}$ , a radiação total solar que incidente na superfície terrestre, sabendo  $I_0$ , a constante de radiação solar.

$$I_{0,eff} = I_0 \left[ 1 + 0,033 \frac{\cos(360d)}{365,25} \right]$$

$$k_T = \frac{I_h}{I_{0,eff} \cos(\theta_Z)}$$

Sendo:

$$\cos(\theta_Z) = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(ah)$$

As variáveis em causa já foram apresentadas anteriormente, sendo correspondentes à geometria solar. O ângulo  $\delta$  é referido em relação ao ângulo de inclinação do eixo de rotação da terra em relação ao sol;  $\phi$  é a latitude (para o Porto é  $41,1^\circ$ );  $ah$  é o azimute do sol em relação ao sul geométrico.

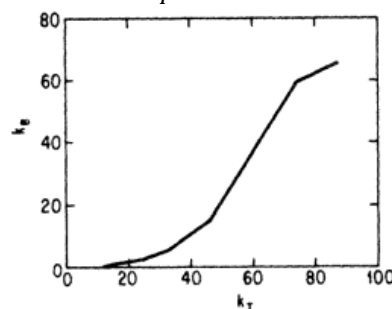
Sabendo que:

$$k_b = \frac{I_b}{I_{0,eff}}$$

Sendo que:

$$k_b = A_i k_T + B_i$$

Depois existe uma tabela, baseada em resultados experimentais que nos dá valores das constantes da recta em relação ao valor de  $k_T$ .



Interval for $k_T$	$A_i$	$B_i$
0.00, 0.05	0.04	0.00
0.05, 0.15	0.01	0.002
0.15, 0.25	0.06	-0.006
0.25, 0.35	0.32	-0.071
0.35, 0.45	0.82	-0.246
0.45, 0.55	1.56	-0.579
0.55, 0.65	1.69	-0.651
0.65, 0.75	1.49	-0.521
0.75, 0.85	0.27	0.395

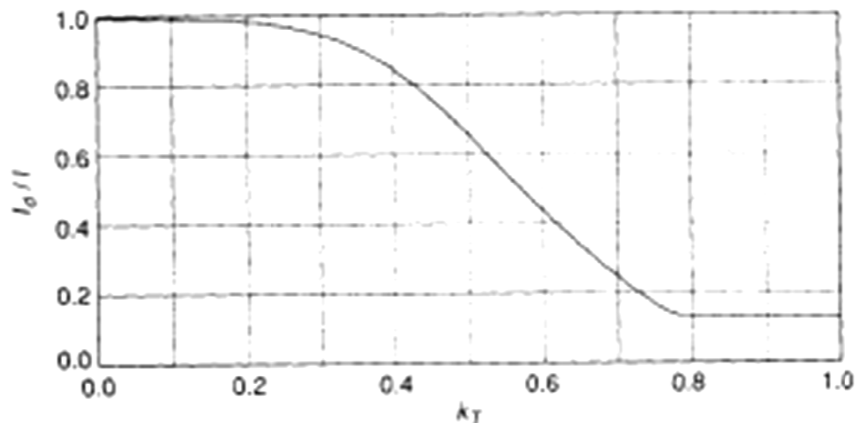
Figura 94 - Tabela e gráfico para valores das constantes da recta em relação a  $k_T$

### 6.4.2. Correlação segundo Dufie

Na correlação do Dufie, o raciocínio é bastante diferente. Neste caso, parte-se da radiação lida na horizontal e calcula-se a quantidade que é difusa. Admitindo que a radiação lida na horizontal é apenas o somatório da radiação difusa e a directa (não é verdadeiro, tendo em conta que existe também radiação reflectida) então a radiação directa na horizontal é conhecida.

Depois basta relacionar a radiação directa na horizontal com a geometria solar para calcular o ângulo de incidência e ter a radiação directa.

Para calcular a relação entre a radiação difusa e a total na horizontal é fornecido um ábaco com um sistema de equações.



$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & \text{for } k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & \text{for } 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ 0.165 & \text{for } k_T > 0.80 \end{cases}$$

ida

Depois, sabendo o valor de  $I_d$ :

$$I_{b,h} = \left(1 - \frac{I_d}{I_h}\right) I_h$$

Podemos dizer que:

$$I_b = \frac{I_{b,h}}{\cos(\theta_z)}$$

¶  
¶

### 6.5. Resultados da modelo teórico e experimental

Os resultados melhoraram bastante, e neste caso foram feitos dois testes, um com o acumulador de 500l e o outro com o acumulador de 150l. A partir deste momento passou a ser possível quantificar o rendimento do colector, ainda que de forma aproximada, pois passamos a ter equipamento para leitura da radiação solar. O ideal seria ter um piréliometro, mas como esse equipamento é bastante dispendioso, optou-se por montar um piranómetro e depois correlacionar a radiação lida com a radiação directa.

O primeiro teste (sem rendimento) foi efectuado para o tanque de maiores dimensões, enquanto o segundo foi para o acumulador de menores dimensões.

#### 6.5.1. Teste com acumulador de 500l

O teste foi efectuado em 2 dias consecutivos, e comparamos com a modelação para cada dia. Neste caso já se obteve mais informação porque foram instalados dois termómetros, um à entrada do circuito e outro à saída.

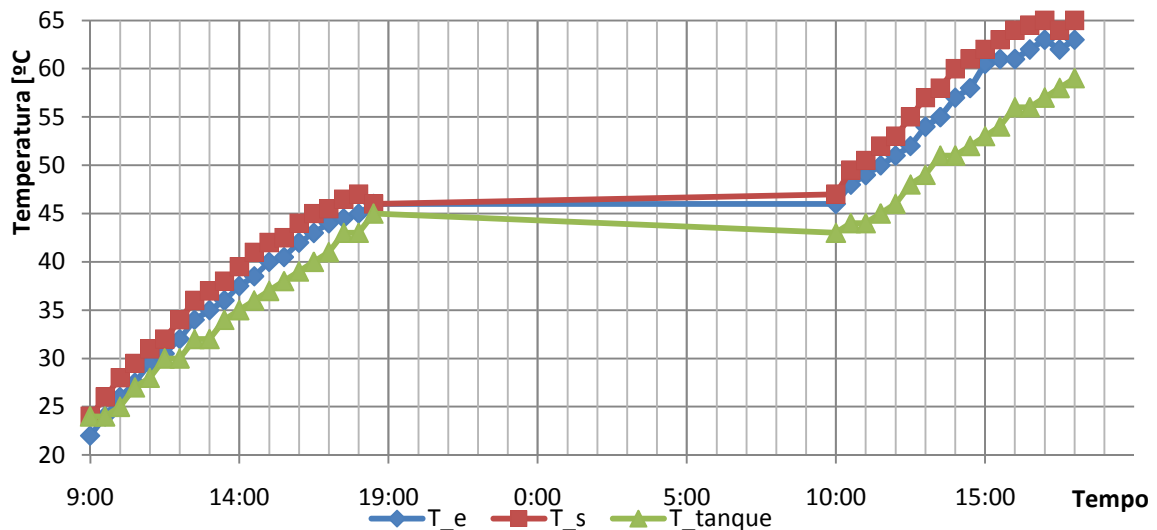


Figura 96 - das temperaturas durante o teste ao protótipo 4 com acumulador de 500l

Também se fez uma análise ao rendimento do colector, seja tendo em conta as temperaturas de entrada e de saída e sabendo o caudal, quer sabendo o tempo entre leituras e sabendo a evolução da temperatura no tanque (regime Instacionário).

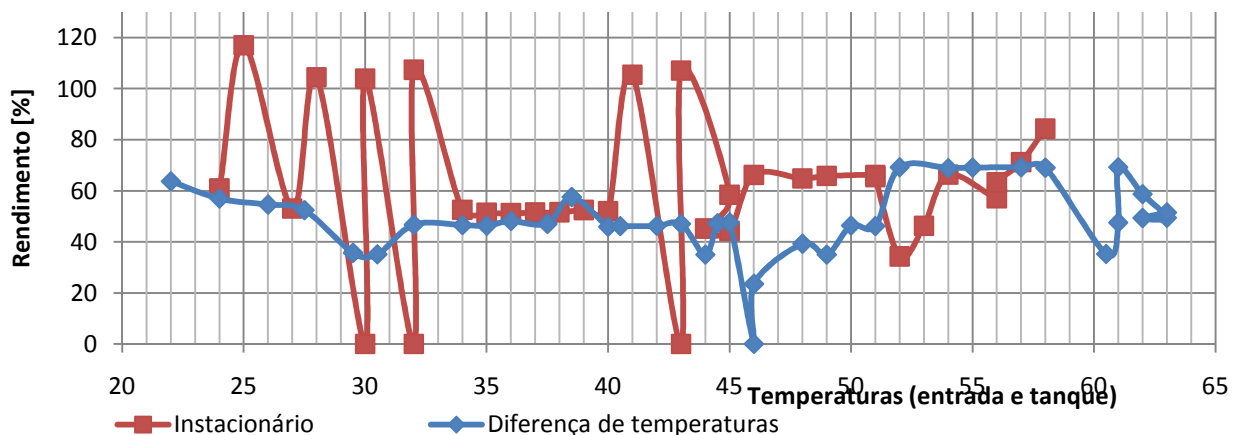


Figura 97 - Rendimento do protótipo 4 com acumulador de 500l

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Como se pode verificar, o rendimento com recurso ao regime instacionário varia muito, porque o transdutor de temperatura usado era digital, pelo que normalmente variava cerca de 1°C em meia hora. Por vezes acontecia de mudar 2 graus em meia hora, mas na meia hora seguinte não mudava nada.



Figura 98 - Transdutor de temperatura

Este tipo de sensor também foi usado para registar a temperatura de entrada e de saída. Para evitar este tipo de situação, optamos por introduzir para o teste do acumulador de 150l transdutores de temperatura analógicos, quer no tanque, quer nas ligações de entrada e saída, iguais entre si.

De referir que este tipo de transdutores não tem grande precisão, podendo ter um erro de  $2\pm^{\circ}\text{C}$ .

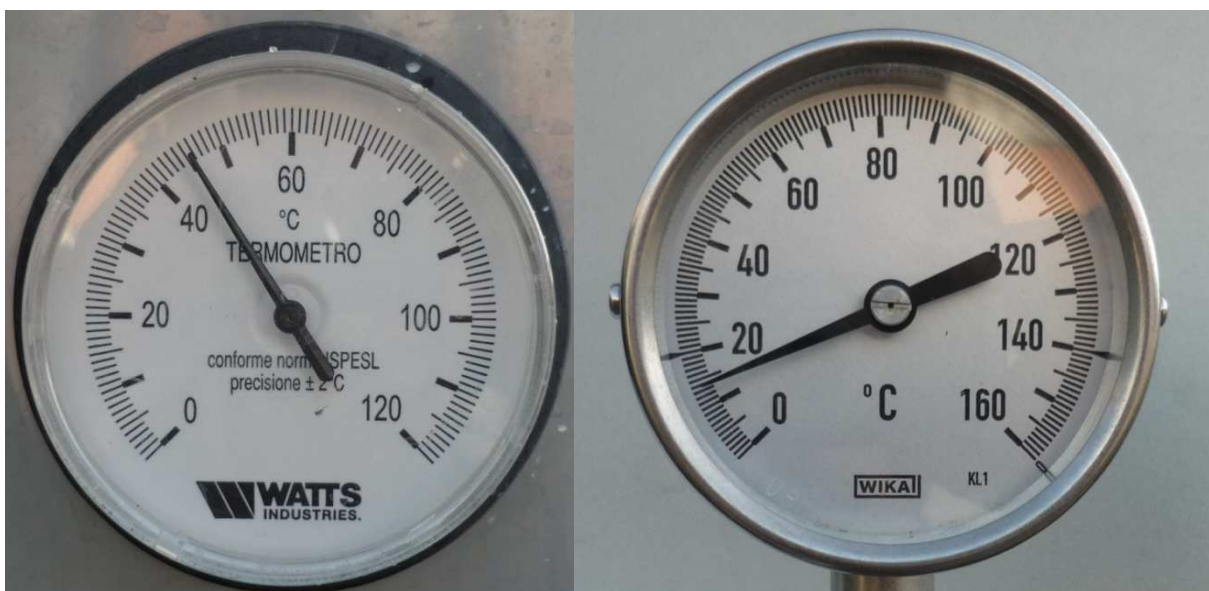
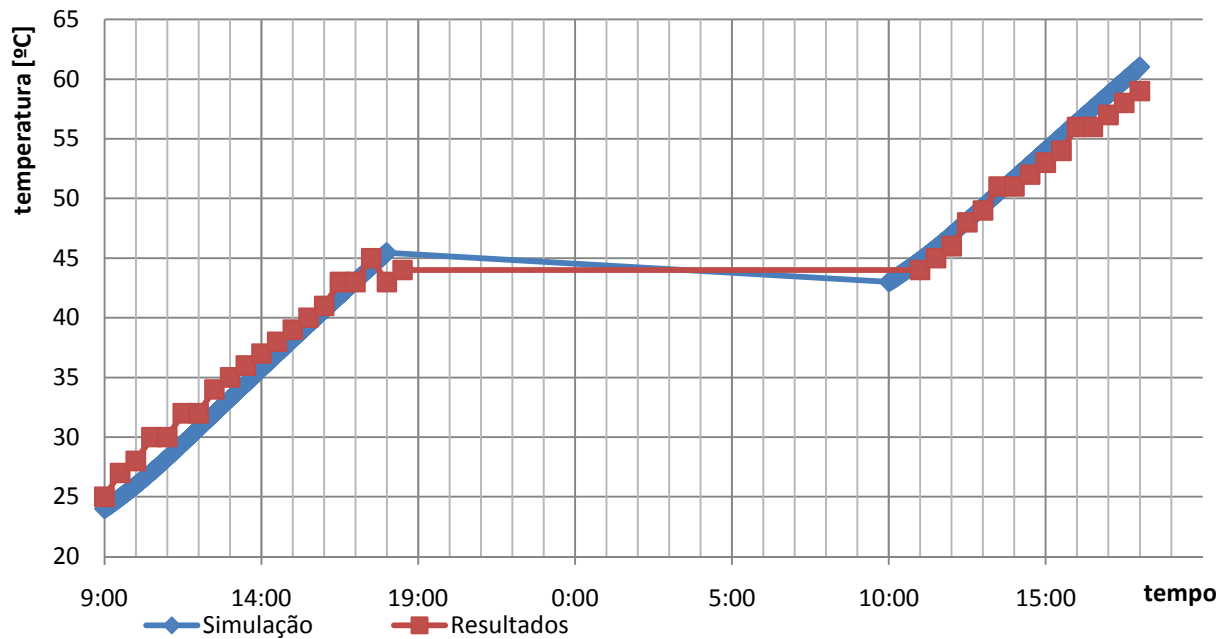


Figura 99 - Transdutores analógicos

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Comparando com a modelação, pode concluir-se que o rendimento do colector está bastante próximo do objectivo, pelo menos para as temperaturas em causa. Como se sabe, uma modelação nunca representa uma situação real, mas pode ser uma boa referência. Não foi efectuada uma modelação para as perdas no depósito durante a noite, mas posteriormente isso deve ser feito, para se saber melhor onde pode estar a existir as maiores perdas de rendimento.

A modelação foi feita com base numa radiação incidente verificada no local e correlacionada pelo método do Rabl.





### 6.5.2. Teste com acumulador de 150l

O teste com o acumulador de 150l foi efectuado num único dia devido às dimensões em causa. Os transdutores usados já foram os digitais.

Mais uma vez foi feita uma recolha de dados da evolução da temperatura de entrada no colector, de saída e no tanque. Com este acumulador é mais fácil perceber como se comporta o colector com a evolução da temperatura de entrada no mesmo, porque o aumento de temperatura no tanque é mais significativo.

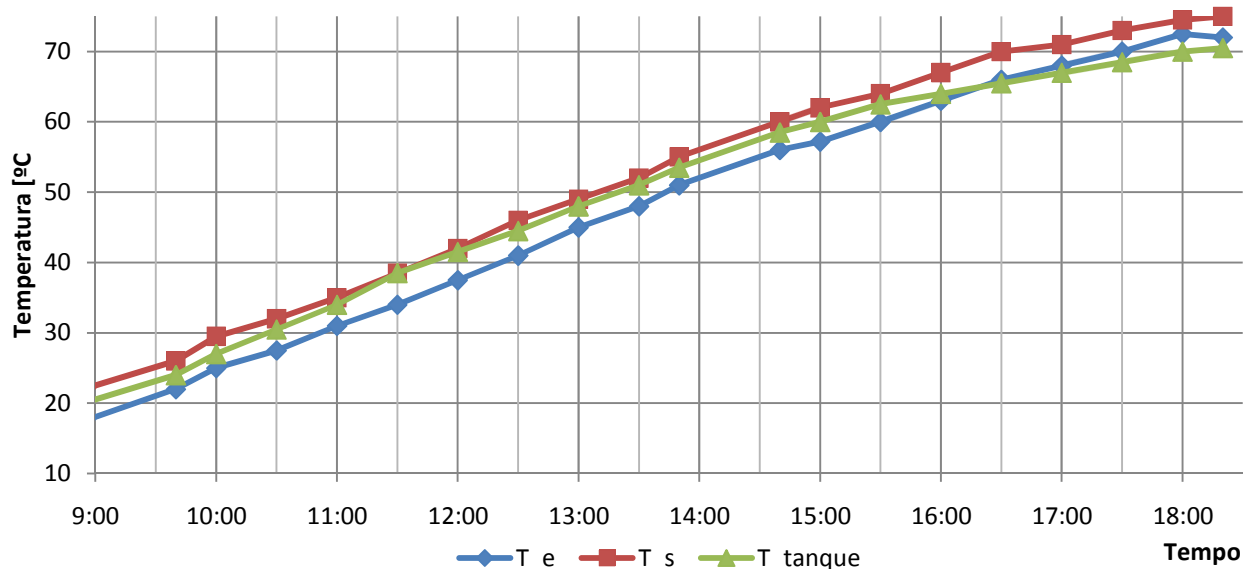


Figura 101 - Evolução das temperaturas durante o teste ao protótipo 4 com acumulador de 150l

Tal como para o teste anterior, foi calculado o rendimento do colector pêra diferença de temperaturas entre entrada e saída e pela evolução da temperatura do tanque.

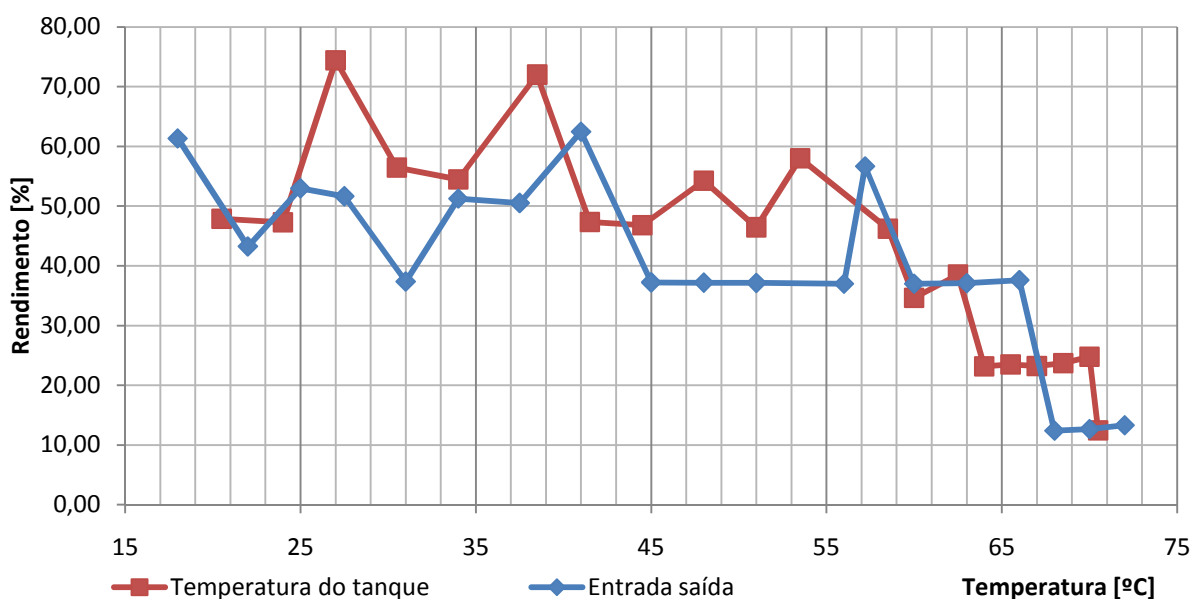
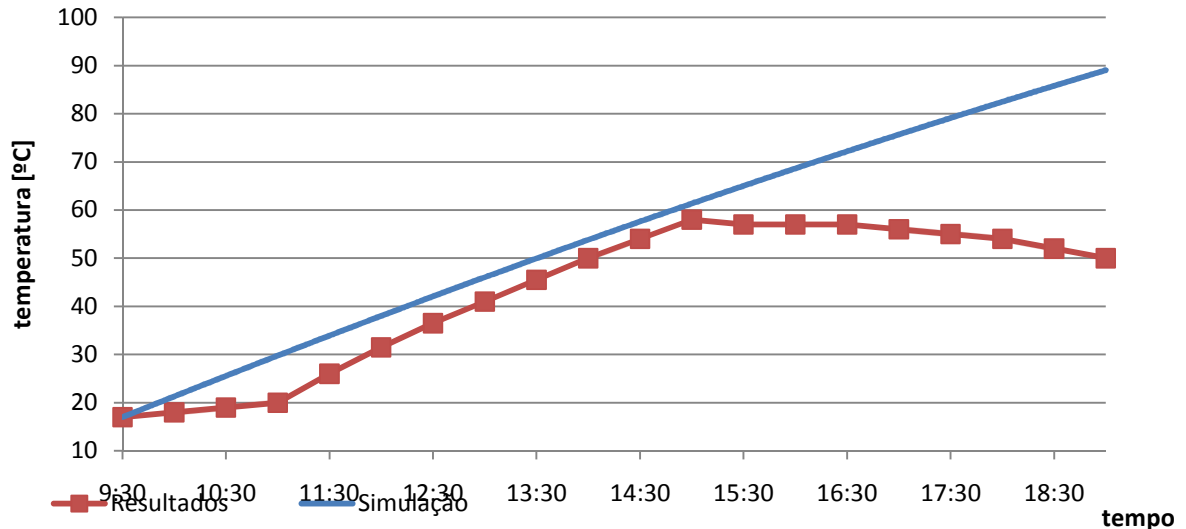


Figura 102 - Rendimento do protótipo 4 com o acumulador de 150l



Depois foi efectuada uma modelação definindo como radiação correspondente igual à correlação de acordo com o livro do Rabl, como no protótipo anterior. Neste caso, a temperatura ambiente usada foi a temperatura ambiente que se registou a cada hora do teste, desta forma, conseguiu-se tornar a modelação mais ajustada às condições do teste, de forma à comparação de dados ser mais correcta.



**Figura 103 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 4, acumulador de 150l**

Na curva da evolução da temperatura do acumulador pode verificar-se que a partir de 50°C, os resultados não conseguem seguir o valor indicado pela modelação, no teste anterior, esta quebra não era tão visível.

O teste com o tanque de 150l serve essencialmente para testar o colector para temperaturas mais elevadas, porque facilmente são atingidas temperaturas elevadas em regime instacionário. Por outro lado é mais difícil traçar uma curva do rendimento do colector porque qualquer acontecimento – o foco ter saído do local, algum problema com o termómetro, alguma nuvem que passe – influencia o resultado final.

O tanque de 500l serve essencialmente para testar o rendimento do colector porque sofre uma influência menos das condições anteriormente faladas.

Ao ter-se dois acumuladores, pode-se controlar melhor o colector. Por exemplo, num dia de algumas nuvens, onde estamos a testar o acumulador 150l e onde temos algum tempo com tempo desfavorável, o que acontece é que ou se para o colector ou vamos perder rendimento nesse momento, podendo mesmo perder calor (havendo apenas radiação difusa a parábola não funciona). Podia pensar então que se desligava. O problema de desligar é que pode por alguns minutos haver radiação directa suficiente e o que acontece é que rapidamente o fluído parado entra em ebulição. Ao entrar em ebulição danifica toda a parte de vedação, sendo por isso necessário abrir o circuito e colocar vedantes novos, porque os existentes não suportam tal temperatura. Esta é uma situação que é necessário estudar para o produto final.

## 6.6. Conclusões

Como se esperava, o rendimento do colector não se alterou muito em relação ao protótipo anterior. Por outro lado, foi possível perceber alguns problemas que o colector ainda possui.

### 6.6.1. Reflectividade do concentrador e efeito das condições atmosféricas

A nível do rendimento, até é possível que este tenha baixado um pouco. Na verdade, apesar de todos os cuidados na limpeza do reflector, o que acontece é que a chapa de alumínio usada não tem capacidade de “auto limpeza”. As chapas com “auto limpeza” têm a capacidade de remoção de pó com recurso apenas a água. O reflector usado não tendo essa capacidade ficava com muito pó, e para além disso quando se tentava limpar o que acontecia é que se riscava muito facilmente ficando cada vez mais fosca, riscada e baça. Isto apesar de todos os esforços em mate-la o mais brilhante possível.



Figura 104 - Limpeza do concentrador com pormenor no estado em que ficava a superfície

Atendendo ao facto que o teste do anterior protótipo foi iniciado com o reflector novo, sem nenhuma sujidade, é normal que os resultados finais acabem por aparecer adulterados. A sujidade na parábola pode levar a que a reflectividade especular desça de 85% para valores de 50 a 70%, comprometendo por isso o rendimento do equipamento.

Pelas simulações efectuadas, mesmo a temperaturas relativamente baixas (50°C) o rendimento da parábola cai significativamente. Aliás, no teste com o acumulador de 150l foi perfeitamente visível que a partir de 60°C de temperatura o rendimento decresce muito, a ponto de demorar quase 4 horas a chegar aos 70°C. Como termo de comparação podemos verificar que para se chegar de 50 a 60°C apenas foram necessárias pouco mais de 2 horas, ou seja o rendimento cai para metade, o que é significativo. Podia argumentar-se que também foi numa hora do dia com menos radiação, mas a verdade é que o dia este com céu limpo e das 15:00h até às 18:00 a radiação solar directa manteve-se com certeza a valores acima da média.

Mesmo para valores de baixa temperatura, o rendimento do colector nunca supera o da modelação, e não podemos esquecer que a modelação está baseada sempre nas piores condições possíveis.

Ou seja, apesar do concentrador ter melhorado significativamente, a verdade é que ainda necessita de ser bastante melhorado.

Apesar de ainda existirem bastantes imperfeições na construção, o grande problema agora terá a ver com o material de reflexão, nomeadamente com o facto de sujar e riscar muito facilmente, porque a evolução do rendimento tem caído ao longo do tempo a que a chapa de alumínio se vai riscando.

Desta forma é necessário pensar num outro tipo de chapa, nomeadamente numa com capacidade de auto limpeza. Para este trabalho não há tempo para fazer este trabalho, e como ainda estão disponíveis 2 chapas de alumínio semelhantes à usada, o que será feito no próximo protótipo é colocar uma chapa nova em cima da existente de forma a conseguir novamente uma boa capacidade a reflexão.

### 6.6.2. Tracking

Outro problema que se registou neste teste (e que já se vinha a desconfiar) era a questão relacionada com o seguidor. O que aconteceu constantemente nestes testes é que durante o amanhecer, isto é, durante o tempo em que o sol “subia” no céu, a parábola tinha sempre tendência a estar sempre mais alta do que devia, e durante o anoitecer acontecia precisamente o contrário, a parábola tinha sempre tendência a ficar mais baixa que o que devia.

A inicio pensou-se que teria a ver com a posição dos sensores, mas depois de se analisar correctamente o problema chegou-se à conclusão que só poderia ter a ver com o facto dos sensores lerem a radiação total e não a apenas a radiação directa.

Como a radiação difusa não tem direcção (na verdade tem, mas para a situação presente isso é irrelevante) o que acontece é que durante a manhã, o colector está com uma grande inclinação. Os transdutores, estão sempre com um grande desfasamento, porque se não tiverem não têm capacidade de operar com as diferenças registadas, como já foi referido anteriormente.

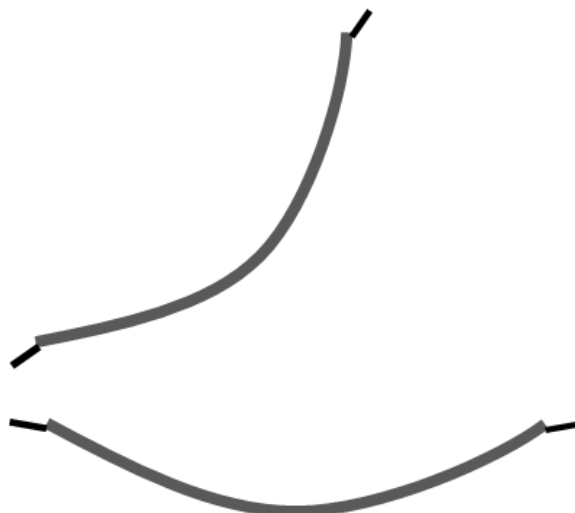


Figura 105 - Posição da parábola ao nascer do sol e quando o sol está na posição mais alta

Assim, de manhã, o sensor que está na parte inferior recebe menos radiação difusa, devido ao ângulo que faz com a horizontal. Já o sensor superior recebe uma quantidade de radiação difusa muito maior porque está quase na horizontal, este fenómeno. A única forma de contornar este problema é conseguir com que os sensores leiam apenas a radiação directa.

A solução passa por ou comprar transdutores que leiam apenas radiação directa, ou então colocar os actuais a lerem radiação directa. Nesta solução, teve-se como exemplo o pireliómetro, que utiliza um tubo para “dissipar” a radiação difusa, como mostra na imagem.

O que se pensou fazer foi exactamente o mesmo aos sensores que estavam em uso. Colocar um fino tubo em cada um deles de forma a minimizar o efeito da radiação difusa.

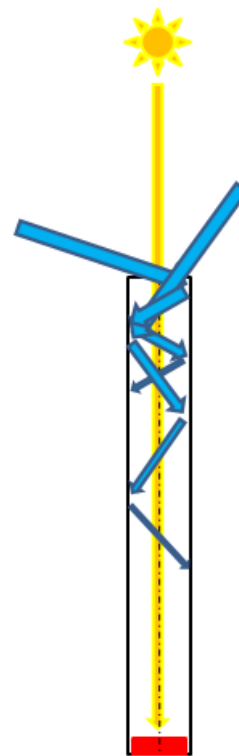


Figura 106 - Actuais sensores e princípio de funcionamento de um pireliómetro

Quando o concentrador se encontra perto da posição final este sistema funciona perfeitamente, porque um dos sensores fica a ler mais radiação do que o outro, e o sistema assume que tem de mudar o posicionamento. A questão põe-se em quando o posicionamento está completamente fora do posicionamento. Neste caso existem duas alternativas:

- Uma passa por ordenar que o motor rode até encontrar o posicionamento ideal. Isso levanta problemas em quando a radiação é realmente baixa, pois nesse caso o sistema dá ordem para o motor continuar a procurar a melhor posição. Esse sistema não funciona muito bem e dá azo a criação de problemas nos motores porque estão sempre a ser solicitados;
- A outra solução passa não por colocar dois tubos nos sensores actuais mas antes colocar dois sensores extra com dois tubos para diminuir o efeito da radiação difusa. Dessa forma, o ajuste “em grosso” é feito pelos sensores “normais” enquanto que o ajuste fino é feito pelos sensores de radiação directa.

Neste trabalho não existiu tempo suficiente para concretizar esta solução, pelo que é proposta em trabalhos futuros no fim do relatório.

## 7. Protótipo 5

Este foi o protótipo final do estágio, pelo que na conclusão será tida em linha de conta trabalhos futuros.

A solução para este protótipo passou por minimizar as perdas para o exterior, com o uso de um tubo de vidro concêntrico com o tubo de cobre (solução apresentada na parte teórica deste relatório).

Neste protótipo procurou-se colmatar todas as falhas identificadas nos protótipos anteriores, seja em aspectos teóricos seja em aspectos construtivos.

### 7.1. Modelação

Para a modelação foi necessário efectuar várias alterações à modelação base, e também algumas considerações extra.

Primeiro é necessário analisar os pontos a considerar no vidro para a modelação. Sabendo que o vidro é um bom isolante, isto é, tem grande resistência à transmissibilidade de calor por condução. Por isso é importante considerar no mínimo 4 pontos para a modelação.

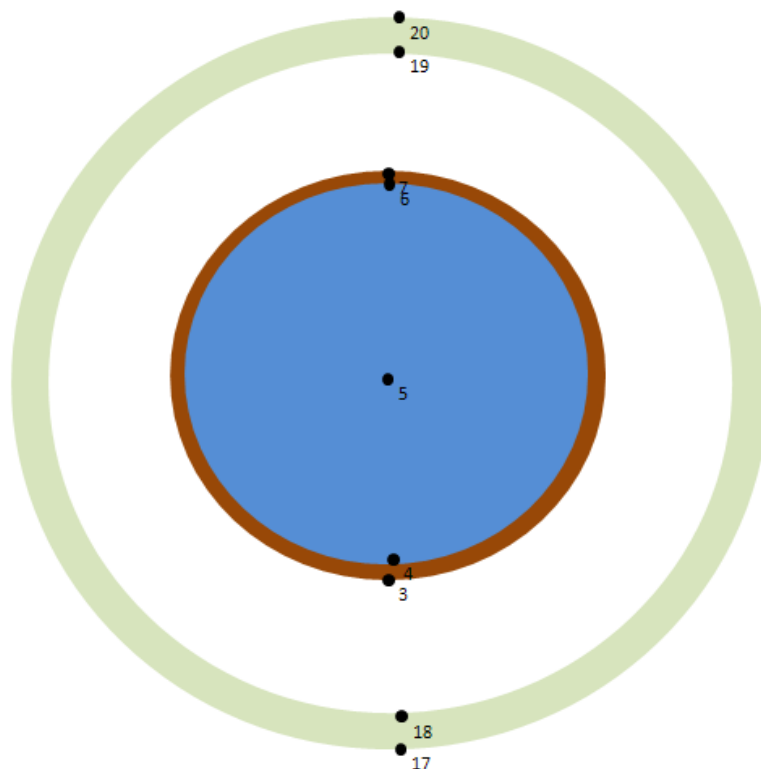


Figura 107 - Pontos da modelação para o tubo de vidro

Nos pontos 18 e 19 existem os seguintes fenómenos de transferência de calor:

- Condução para o ponto 17 e 20 respectivamente;
- Convecção ou condução (dependente do diâmetro do tubo) para o ponto 3 e 7 respectivamente;
- Radiação para o tubo de cobre (3 e 4).

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Nos pontos 17 e 20 foi considerado o mesmo coeficiente de transferência de calor para o exterior, baseado na temperatura do ponto 17. Nestes, estão presentes os fenómenos de:

- Condução dos pontos interiores do tubo;
- Perdas de radiação para o exterior (17 para 10 e 20 para 9);
- Perdas por convecção para o ambiente (17 e 20 para 2);
- Ganhos radiativos referentes à absorção de radiação solar incidente.

A questão principal desta solução passa por tentar minimizar a quantidade de calor transferida do absorvedor para o exterior, e nesse aspecto entra em causa a relação entre o diâmetro do tubo de vidro e do de cobre, como foi explicado na parte teórica.

Para as propriedades do material foi considerado vidro simples de silicato de boro da SCHOTT ROHRGLASS, tendo por base as seguintes características técnicas fornecidas pelo fabricante:

- Coeficiente de transmissão de 0,9
- Coeficiente de absorção de 0,05
- Coeficiente de reflexão de 0,05
- Coeficiente de emissão de 0,90
- Coeficiente de condução de calor de 1,2 W/m<sup>2</sup>K

Começamos por estudar as equações envolvidas na transferência de calor nos pontos do vidro exteriores.

$$IA_{absor}\alpha_{vidro} + \lambda_{vidro}\pi L \frac{(T_{interior\ vidro} - T_{exterior\ vidro})}{\ln(D_{ext}/D_{int})}$$
$$= \alpha_{ext} \left( \frac{A_{ext}}{2} \right) (T_{ext\ vidro} - T_{ext}) + \sigma \epsilon_{vidro} \left( \frac{A_{ext}}{2} \right) (T_{ext\ vidro}^4 - T_{ext}^4)$$

Considerou-se nas perdas por radiação que a o exterior se comporta como um corpo negro. Esta aproximação já foi usada anteriormente, e é perfeitamente válida, visto que, na maior parte dos caso exterior ela é usada. Neste mesmo campo é importante também referir que a temperatura considerada para o exterior, no caso da parte superior do absorvedor é diferente da temperatura para o caso da parte inferior. Isto porque, a temperatura do céu é bastante diferente da temperatura ambiente em dias de céu limpo. Esta consideração também já foi tomada nas anteriores simulações.

Existem várias correlações para calcular a temperatura do céu em relação à temperatura ambiente, algumas mais simples que outras. Essencialmente foram estudadas duas, uma que era referida para unicamente a temperatura ambiente, e outra onde também entrava a humidade relativa do ar. Mas só foi usada a primeira, por ser bastante mais simples.

$$T_{céu} = 0,0552T_{amb}^{1,5} \text{ (em K)}$$

É necessário perceber ainda que a radiação incidente na parte superior é bastante inferior à parte inferior, visto que a radiação na parte inferior é concentrada, ou seja é a radiação solar multiplicada do factor de concentração. Isso tem implicações porque parte da radiação incidente é absorvida, ou seja, na parte superior a radiação absorvida é 40 a 50 vezes inferior à da parte inferior.

Na parte interior as equações que regem a transferência de calor são as seguintes:

$$\begin{aligned} \sigma \varepsilon_{\text{vidro}} \left( \frac{A_{\text{ext}}}{2} \right) (T_{\text{cobre}}^4 - T_{\text{interio vidro}}^4) + \lambda_{\text{eff}} \pi L \frac{(T_{\text{cobre}} - T_{\text{interior vidro}})}{\ln(D_{\text{int}}/D_{\text{cobre}})} \\ = \lambda_{\text{vidro}} \pi L \frac{(T_{\text{interior vidro}} - T_{\text{exterior vidro}})}{\ln(D_{\text{ext}}/D_{\text{int}})} \end{aligned}$$

Neste ponto, é importante referir que para se poder aplicar a equação da transferência de calor por radiação desta forma, é necessário considerar que o tubo de cobre é estudado como um corpo negro. Nesta situação, pode dizer-se que tal é verdadeiro porque a emissividade da tinta preta usada é muito elevada (cerca de 98%) pelo que este raciocínio é também ele válido.

## 7.2. Construção

Na construção, procurou-se focar em três pontos considerados principais que foram sendo identificados com os testes efectuados com os anteriores protótipos:

- Minimizar o contacto entre o vidro e o tubo de cobre mas garantindo o correcto apoio de forma a manter o distanciamento entre eles;
- Aumentar a turbulência do escoamento no interior do tubo de cobre;
- Diminuir as perdas de radiação no absorvedor devido ao foco não estar a incidir totalmente no absorvedor

De forma a garantir que as perdas de radiação baixassem, tentou-se aumentar o diâmetro do tubo de cobre. O problema é que aumentando o diâmetro do tubo de cobre a velocidade do escoamento desce (mantendo o mesmo caudal) e consequentemente o coeficiente de convecção no interior do tubo também diminui. Desta forma, diminui-se o rendimento do colector, por isso aumentar o diâmetro do tubo não foi opção a ter em conta.

Outra solução passava por usar o mesmo tubo, ou um eventualmente mais pequeno soldado a uma superfície selectiva, um pouco à imagem do que acontece nos convencionais colectores planos. A questão neste ponto reside na espessura do absorvedor (muito baixa) que não permite que a transferência de calor para o tubo se dê da melhor forma. Para além disso, existe a questão relacionada com a soldadura, que torna a transferência de calor entre a lamela e o heatpipe menos eficaz.

Desta forma optou-se por agora por achatar o tubo de cobre de forma a aumentar a área de abertura. Conseguiu-se desta forma para além de aumentar a área de abertura aumentar a turbulência do escoamento, porque ao comprimir o tubo diminuiu-se o raio hidráulico, visto que a área de passagem diminuiu e o perímetro manteve-se igual.

Idealmente o tubo deveria ser comprimido todo de uma só vez para evitar empenos e também existirem partes mais comprimidas que outras, tal não foi possível pelo que se comprimiu num torno vulgar com atenção para tentar manter o tubo sem empenos grandes e uniformemente achatado.





**Figura 108 - Tubo de cobre do absorvedor achatado**

Ao achatar o tubo perdeu-se parte da resistência à flexão do mesmo, por isso foi necessário pensar numa forma de construir apoios entre o tubo de cobre e o vidro.

Inicialmente pensou-se em usar um apoio em plástico, o problema é que o plástico derrete para as temperaturas de funcionamento pedidas. Porém experimentou-se usar, visto que para baixas temperaturas (dos testes efectuados) o plástico deveria ser suficiente. Tal não se verificou numa primeira abordagem visto que a radiação incidente é muito intensa provocando um aquecimento excessivo do plástico levando-o a derreter.

Depois pensou em usar-se um cerâmico, o problema era arranjar no espaço de tempo pretendido uma forma que servisse para o pretendido. Pensou então em soldar-se ao tubo 5 apoios de cobre na parte inferior e um na parte superior de forma a fazer suporte. Claro que o cobre é bom condutor, e este não pode ser sem dúvida o método usado para a produção, mas para o protótipo existente é suficiente.



**Figura 109 - Apoios entre tubo de cobre e vidro**



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Para aumentar (ainda mais) a turbulência do escoamento interior do tubo de cobre passou a usar-se uma espiral no interior para que o escoamento seja perturbado, aumentando o coeficiente de transferência de calor.

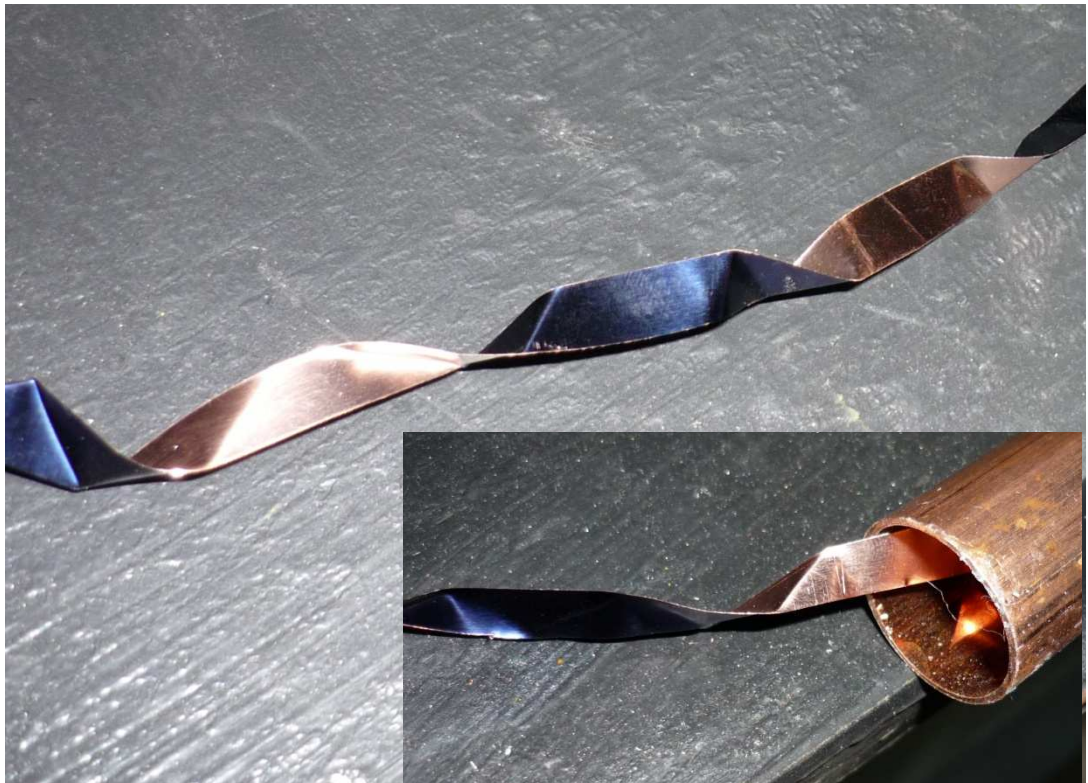


Figura 110 - Espiral no interior do absorvedor

Outra questão muito importante na construção deste protótipo teve a ver com o facto de ter sido introduzido uma nova chapa no concentrador. A chapa que estava colocada estava com uma reflectividade bastante reduzida apesar de estar sempre a ser limpa. Falamos com o fabricante e ele referiu que apesar de a chapa ter boas características ópticas, a presença de água na superfície causa perda de eficiência. Para o futuro é necessário estudar uma chapa com capacidade de resistir às condições atmosféricas.

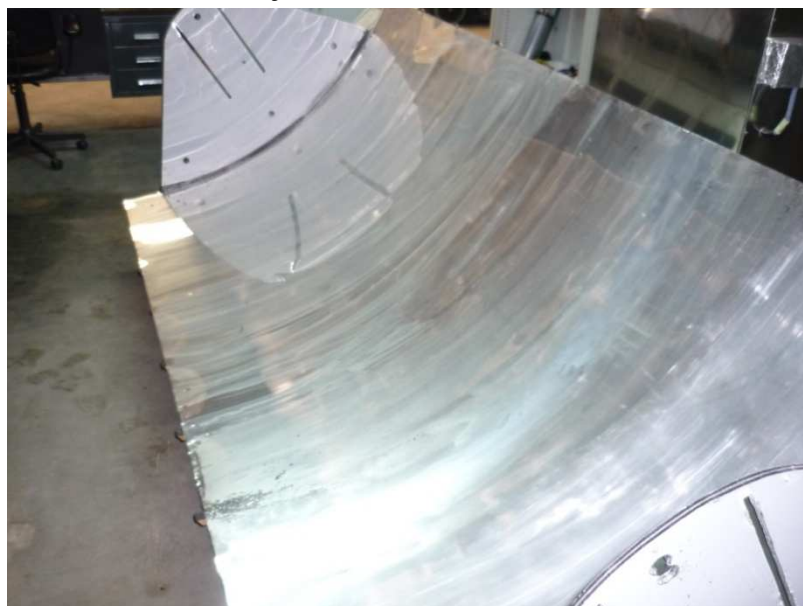


Figura 111 - Chapa reflectora riscada e baça

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Para colocar a chapa foi apenas necessário colocar silicone na chapa existente e colocar a chapa nova, sem efeitos de pressão, porque os efeitos de pressão na chapa anterior causaram um efeito de “tolde” devido à espessura da chapa ser bastante reduzida.



Figura 112 - Parábola com nova chapa reflectora

Teve-se o cuidado durante os dias de mau tempo e durante a noite proteger o reflector de forma a manter por mais tempo possível as características de reflexão da chapa.



Figura 113 - Chapa reflectora protegida

### 7.3. Dimensões

Aqui as dimensões do concentrador já estavam definidas, sendo que apenas as dimensões do absorvedor serão caracterizadas. Em desenho 3D, o tubo de cobre aparece como um tubo circular, mas na verdade é antes uma elipse. Nas dimensões estão feitos os dois casos, porque, para a modelação foi considerado o tubo circular, mas nos testes o tubo foi achatado, considerando por isso uma elipse com altura e comprimento aproximados (medidos no protótipo).

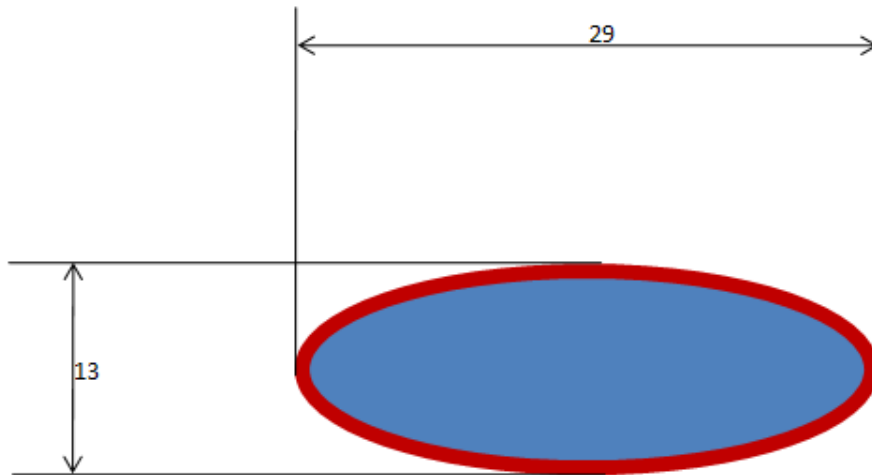


Figura 114 - Dimensões do tubo de cobre

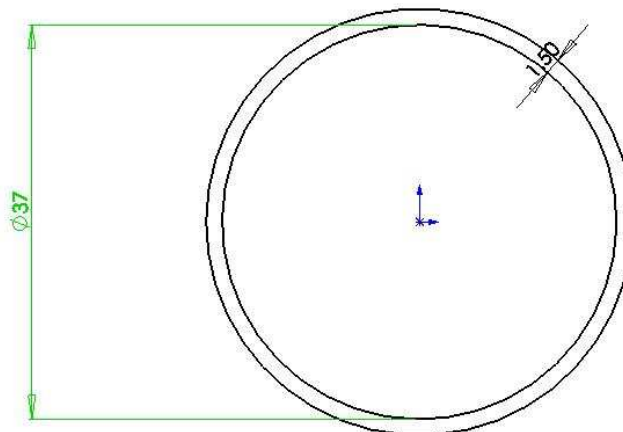


Imagem 1 - Dimensões do tubo de vidro



Figura 115 - Dimensões do absorvedor

Neste caso, a razão de concentração passa a ser a seguinte:

$$RC = \frac{A_A}{A_a} = \frac{1,2 * 2,42}{0,029 * 2,42} \approx 41$$

## 7.4. Resultados da modelo teórico e experimental

Devido a questões climáticas e por necessidade de se terminar o trabalho, apenas foi possível testar o acumulador mais pequeno, de 150l.

Neste foi efectuado um teste onde o colector arrancou pela manhã com a água à temperatura da rede indo depois até à temperatura máxima que o colector possa chegar.

Foi depois efectuado outro teste, um teste a alta temperatura, isto é, começou o dia de testes com o acumulador à temperatura máxima que a resistência pode fornecer (cerca de 70°C) e depois foi iniciado o teste a essa temperatura. Desta forma, é possível testar o comportamento do colector a temperaturas elevadas durante todo o dia.

Também foi feito um estudo comparativo entre os modelos principais para este trabalho, com isolamento na parte superior e com o tubo de vidro, com colectores planos e com a solução inicial.

### 7.4.1. Comparação entre modelos em EES

Foi elaborada uma comparação entre a solução inicial, o protótipo 4 (solução intermédia), o protótipo final (5) e os colectores convencionais. Desta forma é possível perceber como será o comportamento do colector quando se resolver os problemas técnicos.

Esta comparação foi feita para baixas temperaturas (até cerca de 80) pelas seguintes razões:

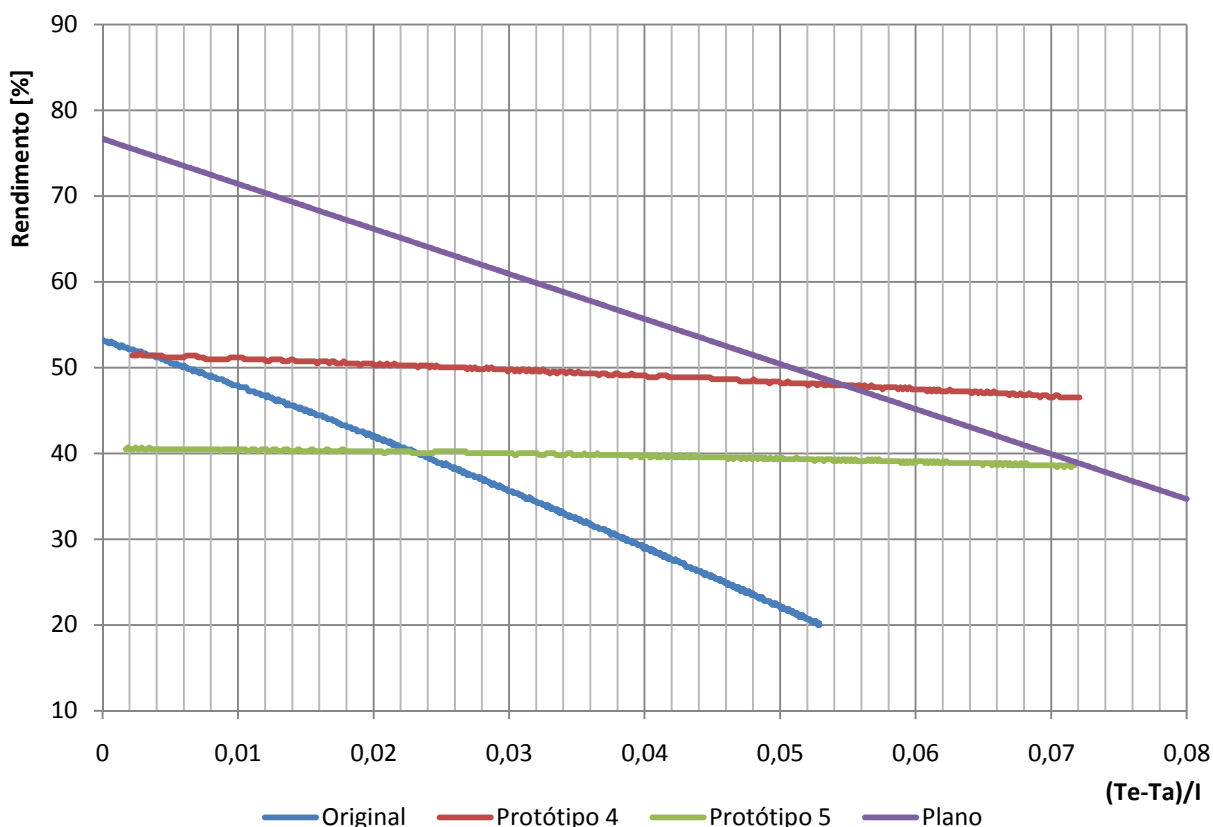


Figura 116 - Curva de rendimento dos colectores (plano, protótipo 4 e 5 e protótipo original)

Fazendo uma análise do gráfico, podemos concluir dos modelos em EES o seguinte:

- A baixas temperaturas, o rendimento dos colectores planos é bastante mais elevado que os protótipos. Isso deve-se ao facto da reflectividade do concentrador não ser muito alta (a chapa de alumínio usada tinha uma reflectividade especular abaixo de 90% (85/86%), e a chapa de inox ainda apresenta resultados piores. Para além disso existia a questão da radiação perdida nas extremidades.
- O pior protótipo é sem dúvida o primeiro, nunca apresentado possibilidades de trabalhar a elevadas temperaturas.
- O protótipo 5 apresenta um rendimento sempre pior que o protótipo 4, mas é notório que as perdas térmicas deste são maiores que o protótipo final, ou seja, é espectável que para altas temperaturas a melhor solução seja o protótipo 5. Como veremos de seguida, os resultados experimentais do último protótipo confirmam que para altas temperaturas a melhor solução é a final. Para além disso, é notório que o modelo do protótipo 4 tem perdas térmicas bastantes mais pequenas do que se consegue na realidade. Tal acontece porque foram desprezadas as perdas térmicas pelos apoios entre tubo e isolamento.
- O colector com melhor rendimento óptico é o colector plano, seguido do protótipo 4, depois o 5 e o protótipo original
- O protótipo final apresenta menores perdas térmicas, seguido do protótipo anterior ao final, do colector plano e da solução original.

Ou seja, pode concluir-se que a evolução nas soluções apresentadas foi no sentido do objectivo do produto, isto é, ter rendimentos aceitáveis para temperaturas elevadas.

### 7.4.2. Teste a baixas temperaturas

O dia deste teste não foi particularmente bom, tendo em conta que por volta do meio do dia o tempo ficou encoberto, sendo que durante a parte da tarde continuaram por breves períodos de tempo (5 min) a aparecer nuvens altas. Desta forma, o rendimento do colector também foi de certa maneira ligeiramente comprometido.

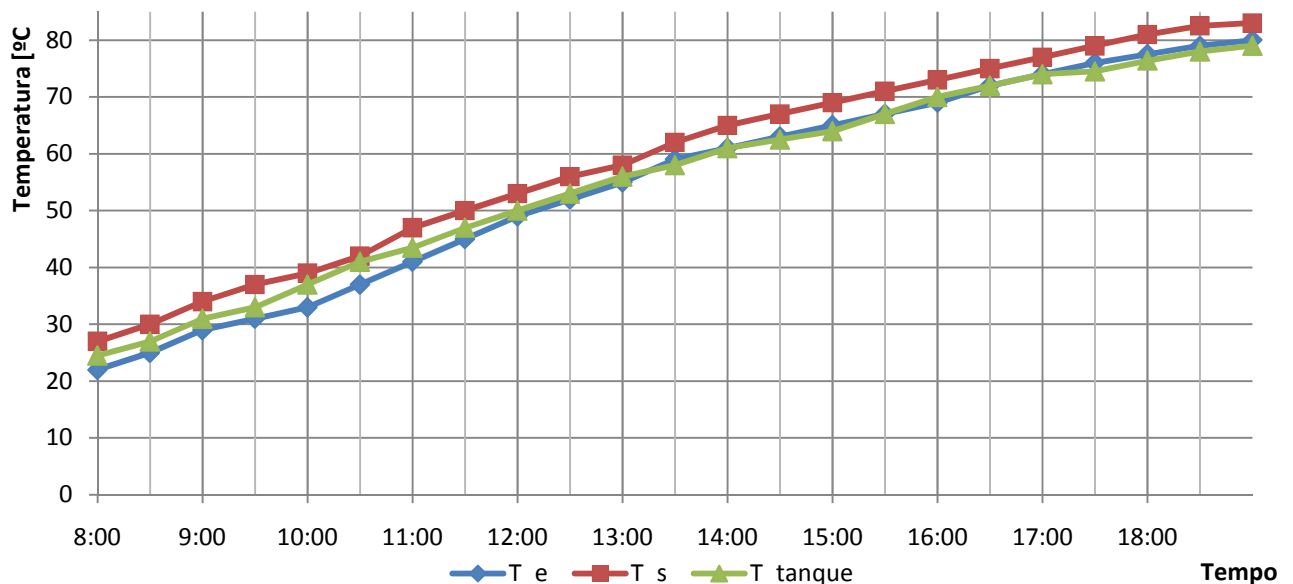


Figura 117 - Evolução das temperaturas durante o teste ao protótipo 5 com acumulador de 150l (baixas temperaturas)



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

Tal como os testes do anterior protótipo de 150l, onde se usou termómetros analógicos, também neste teste foram usados esses mesmos termómetros.

Depois foi efectuado um estudo do rendimento do colector, tendo em conta a radiação lida na horizontal e com as correlações estudadas.

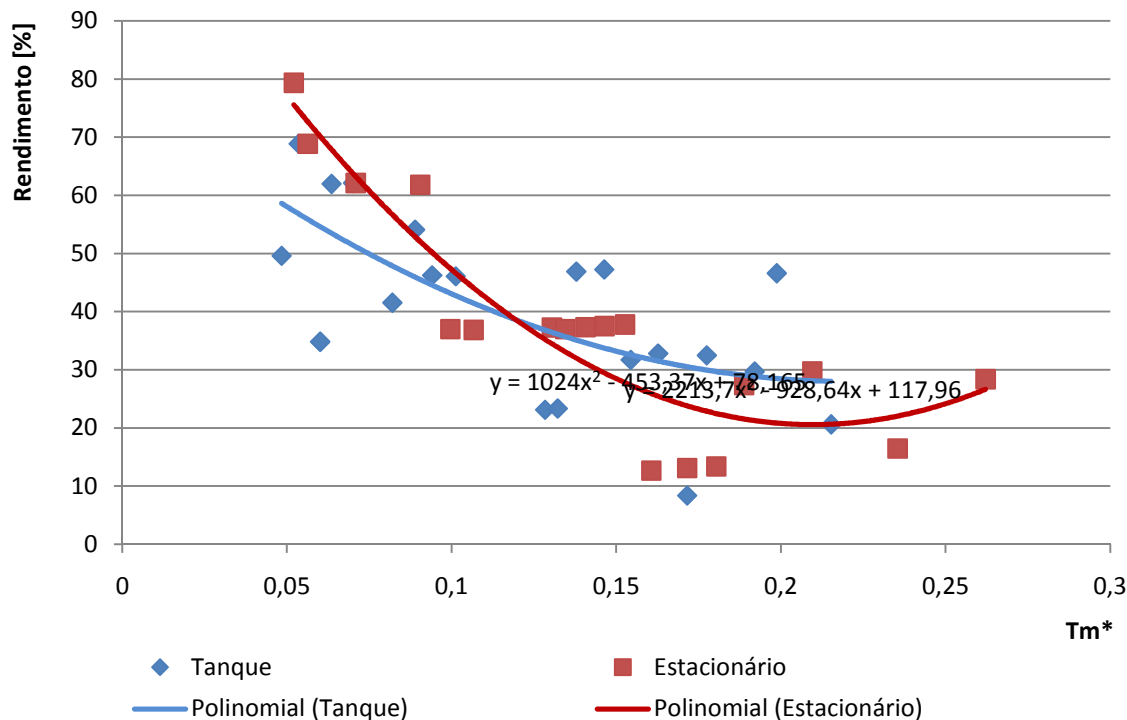


Figura 118 - Rendimento do protótipo 5 a baixas temperaturas

Foi comparada a evolução da temperatura no tanque de acordo com a modelação com os resultados obtidos.

Para a modelação foi usada temperatura ambiente de referência (20°C), mas a radiação usada foi a radiação obtida a partir da radiação lida e de acordo com a correlação presente no livro do Rabl.

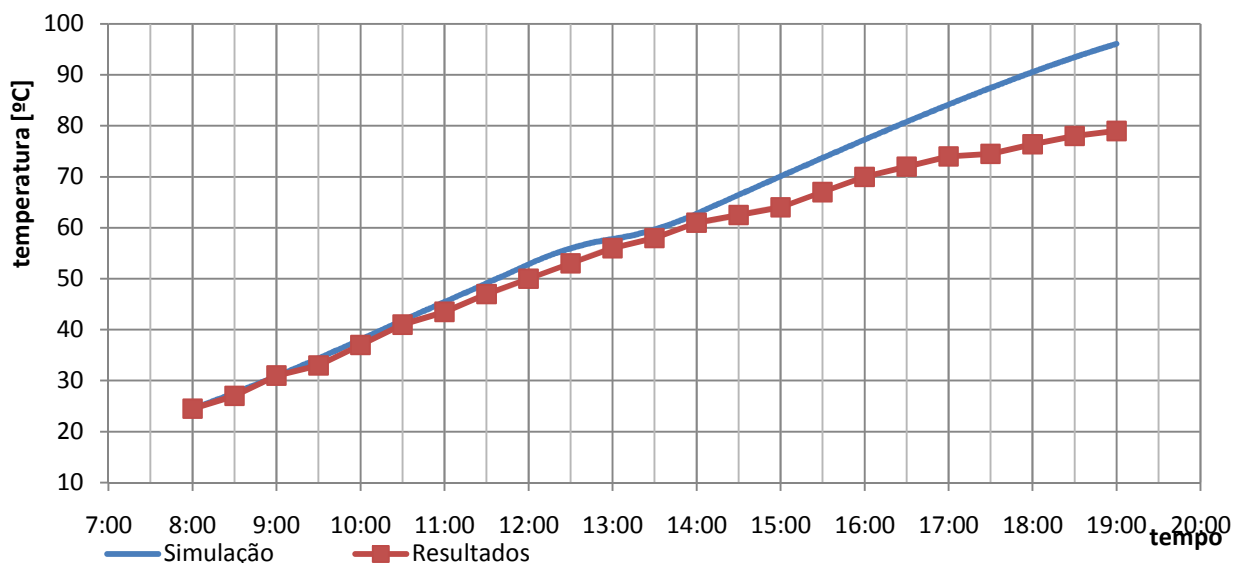


Figura 119 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 4, acumulador de 150l a baixas temperaturas

Tal como o anterior protótipo, a temperaturas mais elevadas os resultados continuam a não ser satisfatórios. Depois na conclusão será feita uma análise mais detalhada, e o próprio ensaio a altas temperaturas tem mais informação que neste teste. De qualquer forma, este teste pode ser comparado ao do anterior protótipo, e enquanto no anterior conseguimos atingir apenas 70 °C, neste foi possível chegar perto dos 80, e é conveniente referir que a baixas temperaturas, teoricamente, o rendimento desta solução é pior que a anterior.

### 7.4.3. Teste a temperaturas elevadas

Tendo em conta que o teste a baixas temperaturas deste protótipo apresentou resultados bastante melhores, tomou-se a decisão de avançar com um teste começando com a temperatura no tanque mais elevada, cerca de 70. Continuou-se tirar o rendimento segundo as temperaturas de entrada e pela evolução da temperatura do tanque, tendo em conta os valores de radiação lidas na horizontal (total).

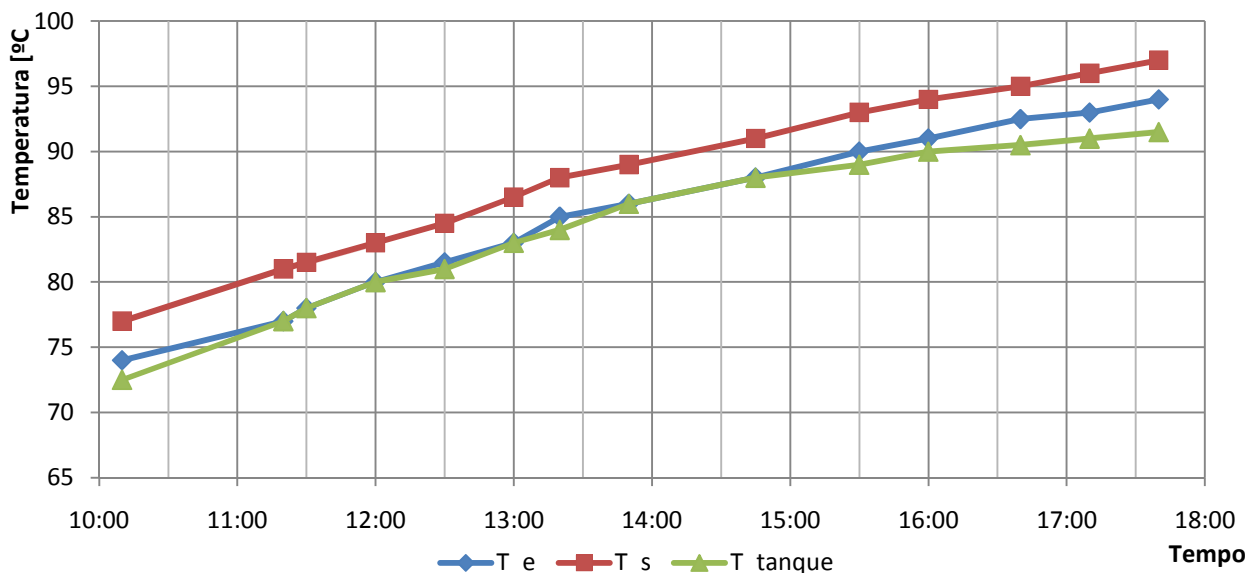


Figura 120 – Evolução das temperaturas durante o teste ao protótipo 5 com acumulador de 150l (altas temperaturas)

A comparação foi feita também para os resultados dados pela simulação. Neste caso, a simulação começa a ter problemas, porque para a pressão do sistema o fluido passa do estado líquido para vapor, o que condiciona os resultados. O que foi feito foi continuar com os valores imediatamente anteriores. Na verdade, não é importante testar este modelo para altas temperaturas, visto que, para altas temperaturas será necessário utilizar outro fluido, o que implica grandes mudanças no modelo.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

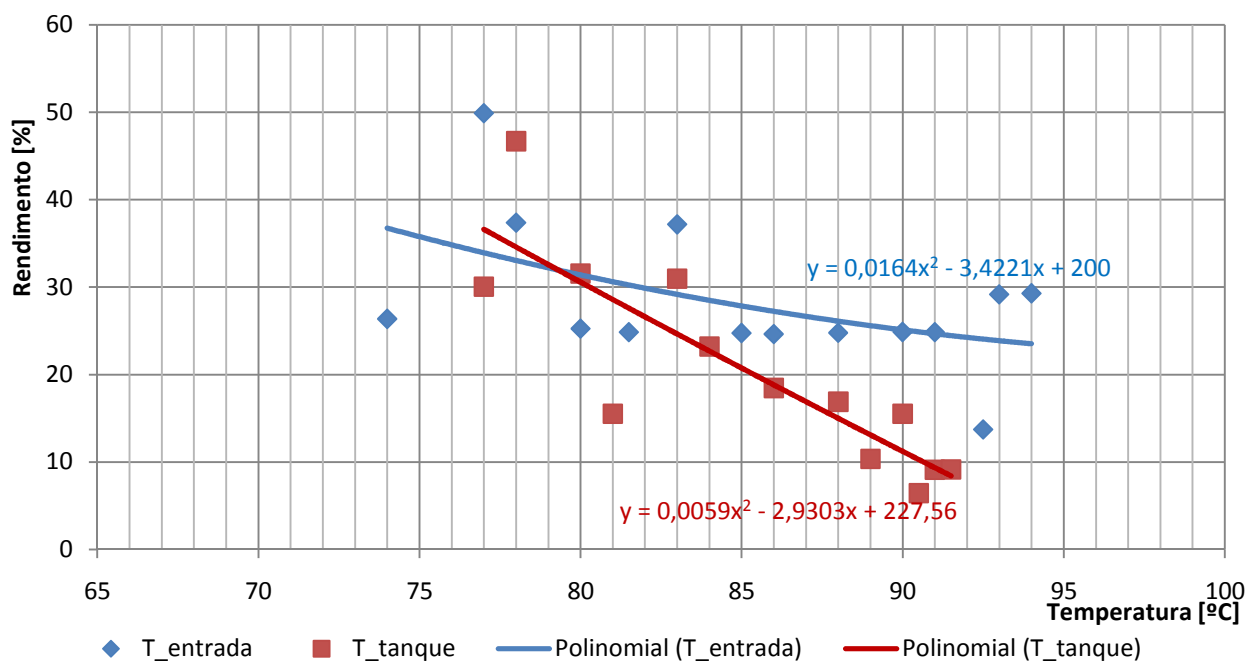


Figura 121 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 4, acumulador de 150l a altas temperaturas

O rendimento pela temperatura é bastante superior ao do tanque por várias razões que serão apresentadas já de seguida na conclusão, mas para os resultados é importante referir que a resolução dos termómetros é bastante baixa, o que condiciona a incerteza dos resultados.

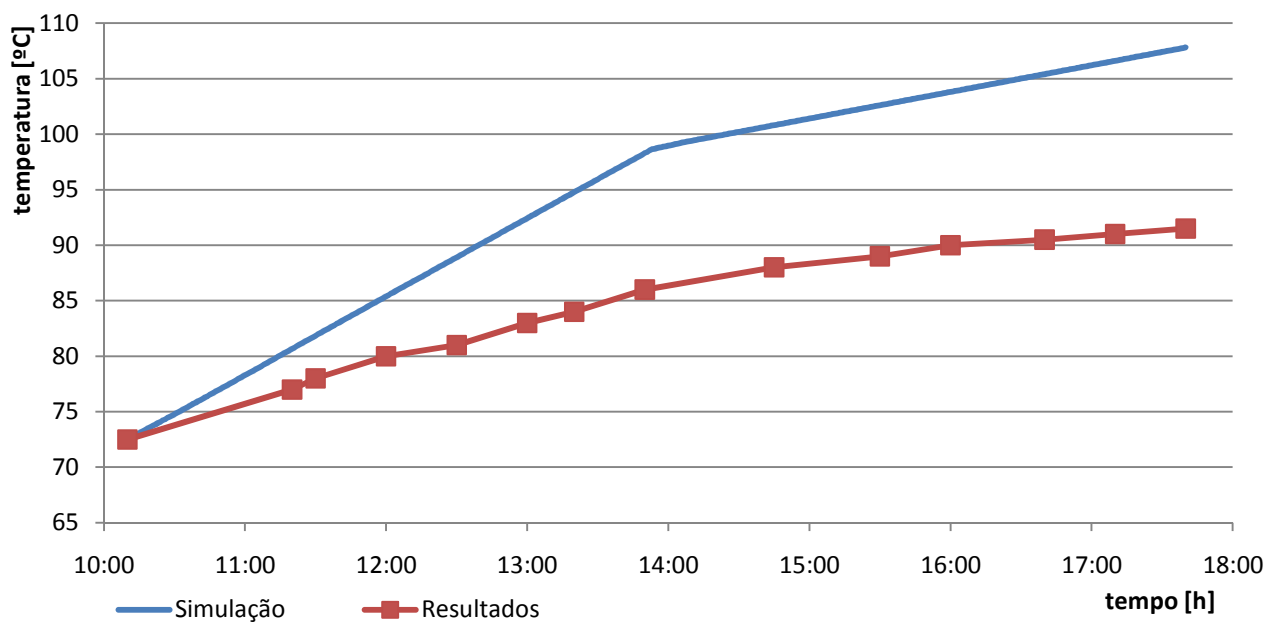


Figura 122 - Comparação entre resultados obtidos e modelação para evolução da temperatura do tanque do protótipo 4, acumulador de 150l a altas temperaturas

A altas temperaturas, o rendimento do sistema não foi o que esperávamos, nas conclusões será elaborada uma análise dos resultados. Porém, é necessário entender que o rendimento em causa é o rendimento do sistema e não do colector, pelo que isso poderá ter graves implicações.



## 7.5. Conclusão

Quanto ao teste a baixas temperaturas pode concluir-se que os resultados melhoraram, na medida em que não se perdeu muito rendimento a baixas temperaturas. De facto, era espectável que se perdesse rendimento a baixas temperaturas, porque neste caso, o rendimento óptico assume maior importância que as perdas térmicas, e, ao introduzir-se o vidro diminuiu-se o mesmo.

Na verdade, tal pode ser explicado pelo facto de ao ter-se achatado o tubo, diminuiu-se a quantidade de radiação “perdida”. Ou seja, o que se perdeu ao colocar o vidro, ganhou-se em ao aumentar a área de absorção.

Apesar de tudo ainda existe radiação que é desperdiçada porque não é possível concentrar num único ponto. Por isso o próximo protótipo terá uma área de abertura maior.

No sentido tentar ter uma melhor transferência de calor entre o metal e o fluido, o próximo protótipo terá alhetas no interior do tubo. Tornar o tubo mais pequeno também é o caminho de forma a aumentar a velocidade de escoamento.

O material de construção será o alumínio, visto ser muito difícil encontrar um tubo com estas características, enquanto em alumínio é facilmente obtido por extrusão.

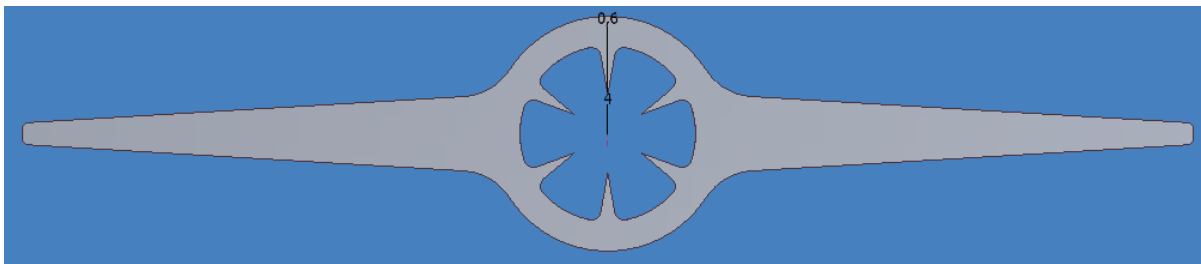


Figura 123 - Esquema do próximo tubo do absorvedor

A altas temperaturas o resultado foi menos animador, visto que o resultado obtido não acompanhou nem de perto nem de longe os resultados esperados. Isto pode dever-se a um conjunto de problemas com o colector, e outros com o próprio sistema de testes.

Começando pelo colector, um dos problemas identificados no teste de baixas temperaturas, é que apesar de ter sido aumentada a área de absorção continua a não existir um aproveitamento total da radiação solar. Contudo, ao achatarmos o tubo de cobre diminuimos a distância lateral entre o vidro e tubo. Desta forma, é normal que lateralmente exista uma perda bastante elevada de calor. Por outro lado, o foram considerados no escoamento interno aerodinâmico entre vidro e o heatpipe que os tubos eram concêntricos. Na realidade, deixa de ser entre tubos concêntricos, ou seja, o pressuposto inicial pode estar em causa.

Para além disso, existem 6 pontos de contacto entre o vidro e o heatpipe (apoios) que não foram considerados no modelo, contribuindo este também para uma diminuição do rendimento do equipamento.

Porém, estima-se que o rendimento experimental é mais baixo que o esperado a temperaturas elevadas, devido às perdas na tubagem de ligação.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

De facto, existem muitas zonas de ligação não isoladas, mal isoladas ou com isolamento insuficiente, nas quais se incluem:

- Tubo corrugado não isolado nas ligações ao colector e ao tanque, para além de tubo de cobre do colector não isolado. De referir que esta situação é particularmente gravosa tendo em conta que normalmente o tubo corrugado induz ao escoamento turbulência, diminuindo por isso a resistência à transferência de calor.



Figura 124 - Ligações ao colector e tanque sem isolamento

- Existe isolamento que tem claramente uma espessura insuficiente. Isso pode constatado porque no teste o exterior do isolamento estava bastante quente (cerca de 50°C)



Figura 125 - Isolamento com baixa espessura

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

- Existem locais onde não existe nenhum isolamento. Para além disso, existem normalmente nesses locais acessórios, tais como; termómetros, válvulas, tês, que introduzem turbulência no escoamento.



Figura 126 - Zonas sem isolamento

- A bomba não estava isolada e para além disso estava ligada directamente ligada ao tanque, fazendo com que mesmo sem fluído a circular estivesse a dissipar calor por estar em contacto directo com o tanque. A serpentina existente não foi tapada, aumentando assim as perdas para o exterior.



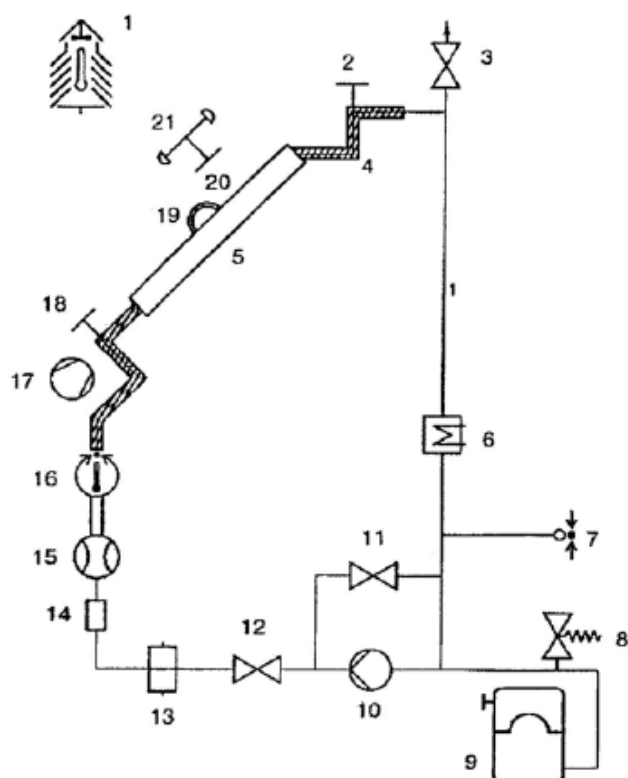
Figura 127 - Bomba sem isolamento e serpentina destapada

No próximo protótipo deverá ser feito o teste com todas estas zonas devidamente isoladas, de forma ao rendimento obtido experimentalmente seja o mais próximo possível do rendimento esperado pela modelação.

Para além disso, deverá ser feito um teste no posto que cumpre com a norma de testes laboratoriais de colectores, a EN 12976-2. O posto de testes foi montado para se fazer o teste deste protótipo nessas condições, mas infelizmente o tempo não foi suficiente para ser testado.

Para o teste, a instalação sofrerá algumas alterações passando a ser de acordo com o que diz a norma.

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico



### Legenda

- |   |  |
|---|--|
| 1 Sensor de temperatura do ar ambiente                          | 11 Válvula de "bypass"                 |
| 2 Sensor de temperatura ( $t_a$ )                               | 12 Válvula de controle do caudal       |
| 3 Abertura para ventilação de ar                                | 14 Visor de vidro                      |
| 4 Conduta com isolamento  | 15 Medidor de caudal                   |
| 5 Colector solar  | 16 Regulador de temperatura secundário |
| 6 Aquecedor/arrefecedor para o controle da temperatura primária | 17 Gerador de vento artificial         |
| 7 Sensor de pressão   | 18 Sensor de temperatura ( $t_{in}$ )  |
| 8 Válvula de segurança  | 19 Pirgeómetro                         |
| 9 Vaso de expansão  | 20 Piranómetro                         |
| 10 Bomba de circulação  | 21 Anemómetro                          |

Figura 128 – Esquema do teste pela norma EN 12976-2

## 8. Conclusões

### 8.1. Conclusão

Podemos concluir ao fim deste trabalho vários aspectos; aspectos relacionados com o protótipo e outros com o desenvolvimento/desenrolar do trabalho.

Durante o trabalho foram sendo assimilados vários conceitos, e pode-se concluir que toda a base teórica leccionada (principalmente nas cadeiras relacionadas com a energia térmica) até ao início do estágio foi particularmente útil, na medida em que, é possível ter uma noção clara dos fenómenos intervenientes no processo de transformação da energia solar em energia térmica.

Contudo, é preciso um tempo de aprendizagem à parte mais técnica de construção. Na verdade, este estágio serviu para que se comesçassem a perceber melhor os parâmetros construtivos, porque nem sempre o que é teoricamente mais correcto, resulta na prática. Para além disso, ficou-se a conhecer os principais fornecedores de materiais para colectores, assim como principais mercados para o equipamento, visto que durante o estágio foi proporcionada a visita a uma das principais feiras europeias de equipamento energéticos com fonte renovável, a Genera em Madrid

Pode-se também concluir que neste tipo de colectores é bastante difícil conseguir concentrar a radiação solar num único ponto, neste caso numa linha. Apesar de ter sido melhorado o concentrador, nomeadamente o perfil da parábola, o que acontece actualmente é que já se conseguiu concentrar a radiação numa área relativamente pequena, mas não suficientemente pequena. Ou seja, evolui-se, mas ainda não é suficiente.

Com os testes efectuados pode também concluir-se que a ideia original de colocar isolamento na parte superior, nunca deu resultados que nos levassem a acreditar que essa solução resultasse para temperaturas elevadas. A solução do vidro é a única capaz de chegar perto dos objectivos finais para o produto.

Também foi possível perceber como funciona o sistema de tracking, e quais os problemas principais. De facto, não havia a mínima noção de como era feito a perseguição do sol. Inicialmente (antes do estágio começar) havia a ideia que era feito tendo em conta as equações da geometria solar. Foi bastante positivo neste caso, porque para além de se ter percebido como funcionava o sistema de tracking, percebeu-se os problemas existentes no mesmo e como poderão ser resolvidos.

Por fim, é importante referir que um dos objectivos era correlacionar a teoria leccionada ao longo do curso com a prática, sendo que pode concluir-se que tal foi conseguido.

## 8.2. Trabalhos futuros

Depois de todos os testes sabemos que no futuro é necessário continuar a evoluir este equipamento, porque ainda não foi atingido o rendimento esperado para o protótipo.

No futuro próximo deverão ser testadas novas formas de parábola (mais abertas ou mais fechadas) para que se consiga perceber o efeito da mudança no rendimento da parábola, principalmente na razão de concentração conseguida. Paralelamente deve ser abandonado a chapa concentradora existente, visto que não pode estar no exterior porque perde as propriedades ópticas. Também nesse sentido é necessário fazer um benchmark do mercado de reflectores para perceber qual o que se pode adequar melhor ao protótipo.

As chapas também devem ser testadas sempre em protótipos de absorvedores já devidamente aferidos para que se possa tirar uma conclusão válida. Neste seguimento, talvez passe a útil construir outra parábola para que possam ser testadas várias soluções num curto espaço de tempo.

Tal como a chapa reflectora, também o absorvedor deverá ser modificado, deverá ter as características que adiantadas nas conclusões do protótipo<sup>5</sup>. Mas essencialmente deverá ter:

- Maior área de abertura
- Vidro com maior diâmetro
- Tubo onde circula o fluído passará a ser alhetado e em alumínio

Para além disso foi desenvolvido ao longo do trabalho uma proposta para o aspecto final do produto, tendo em conta que tem de ser fácil de montar e apresentar uma grande rigidez. Até agora foi apenas definido a técnica de construção e o aspecto, mas no futuro, é necessário fazer simulações do comportamento estrutural a várias solicitações, com recurso a software específico, como o Cosmos do SolidWorks.

Para finalizar, é importante referir que é necessário resolver o problema identificado no sistema de acompanhamento do sol que tem o problema de “ler” a radiação total e não apenas a radiação directa. Uma das soluções já foi apresentada e passa por 4 sensores para ajuste da altura, sendo os que lêem a radiação total para ajuste grosso e para fino os de radiação directa. Outra solução passa por usar 3 sensores, dois de radiação total e outro colocado junto do absorvedor, que faz o ajuste fino, parando na posição onde o 3º sensor receber maior quantidade de energia.

## **9. Referências e Bibliografia**

1. Smith, William F.; “Princípios de ciência e engenharia de materiais”; Terceira edição; McGraw-Hill; 1998
2. Incropera, Frank P.; De Witt, David P.; “Transferência de calor e de massa”; Quinta edição; LTC editora; 2003
3. Braga Filho, Washington; “Transmissão de calor”; Thomson; 2004
4. Oliveira, Florinda M.T.D.; “Revestimentos selectivos para colectores solares”; Tese de mestrado; Abril; 1989
5. “How produced”; catálogo da Bluetec ETA-Plus
6. Kreith, Frank; Kreider, Jan F.; “Principles of Solar Engineering”; McGraw-Hill; 1978
7. Duffie, John A.; Beckman, William A.; “Solar Engineering of Thermal Process”; segunda edição; John Wiley & Sons; 1991
8. Rabl, Ari; “Active Solar Collectors and their Applications”; Oxford; 1985
9. Shelby, James E.; “Introduction to glass science and technology”; RSC Paperbacks; 1997
10. Rohsenow, Warren M.; Hartnett, James P.; Cho, Young I.; “Handbook of HEAT TRANSFER”; McGraw-Hill; Terceira edição; 1998






## 10. Anexo A

Neste anexo são descritas as características dos equipamentos fornecidas pelos fabricantes. Desde bombas a acumuladores, e outros materiais importantes.

### Bomba Grundfos

Posição	Quantid.	Descrição	Preço Unit.
	1	<p><b>UP8 16-40 130</b></p>  <p><i>Nota: Imagem do produto pode diferir do prod. real</i></p> <p>Código: 96281368</p> <p>A bomba dispõe de um rotor encamisado, ou seja, a bomba e o motor formam uma unidade integral sem empanque e com apenas duas juntas de vedação. Os rolamentos são lubrificados pelo líquido bombeado. A bomba dispõe de um selector de velocidade de 3 passos.</p> <p>A bomba é caracterizada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Velo de cerâmica e rolamentos radiais.</li> <li>- Rolamento axial de carbono.</li> <li>- Cápsula de rotor e placa da chumaceira em aço inoxidável.</li> <li>- Impulsor resistente à corrosão, Compósito, PEG/PP.</li> <li>- Corpo da bomba Ferro fundido.</li> </ul> <p>Trata-se de um motor de 1 fase.</p> <p>Não é necessária uma protecção adicional do motor.</p> <p><b>Líquido:</b> Gama de temperatura do líquido: 2 ... 110 °C</p> <p><b>Técnicos:</b> Classe TF: 110 Homologações na chapa de características: VDE, GS, CE</p> <p><b>Materiais:</b> Corpo da bomba: Ferro fundido EN-JL1030 ASTM 30 B Impulsor: Compósito, PEG/PP</p> <p><b>Instalação:</b> Temp. amb. máx. c/ líquido a 80°C: 40 °C Pressão máx. de funcionamento: 10 bar Ligação à tubagem: G 1 Estágio da pressão: PN 10 Distância entre flanges: 130 mm</p> <p><b>Car. eléctricas:</b> Potência absorvida na velocidade 1: 25 W Potência absorvida na velocidade 2: 30 W Potência máxima absorvida: 45 W Frequência da rede: 50 Hz</p>	A pedido

Impresso do CAPS Grundfos

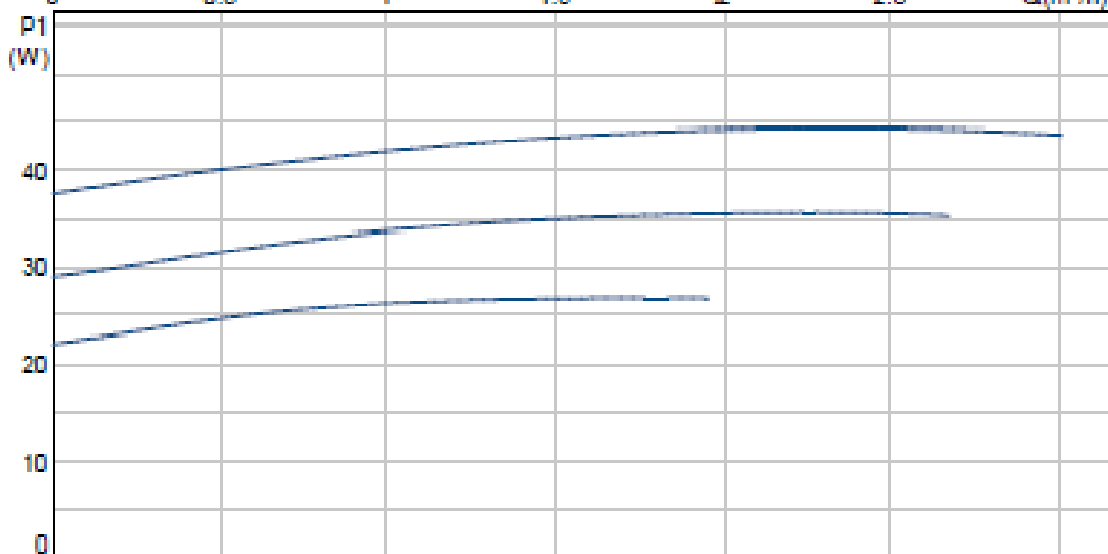
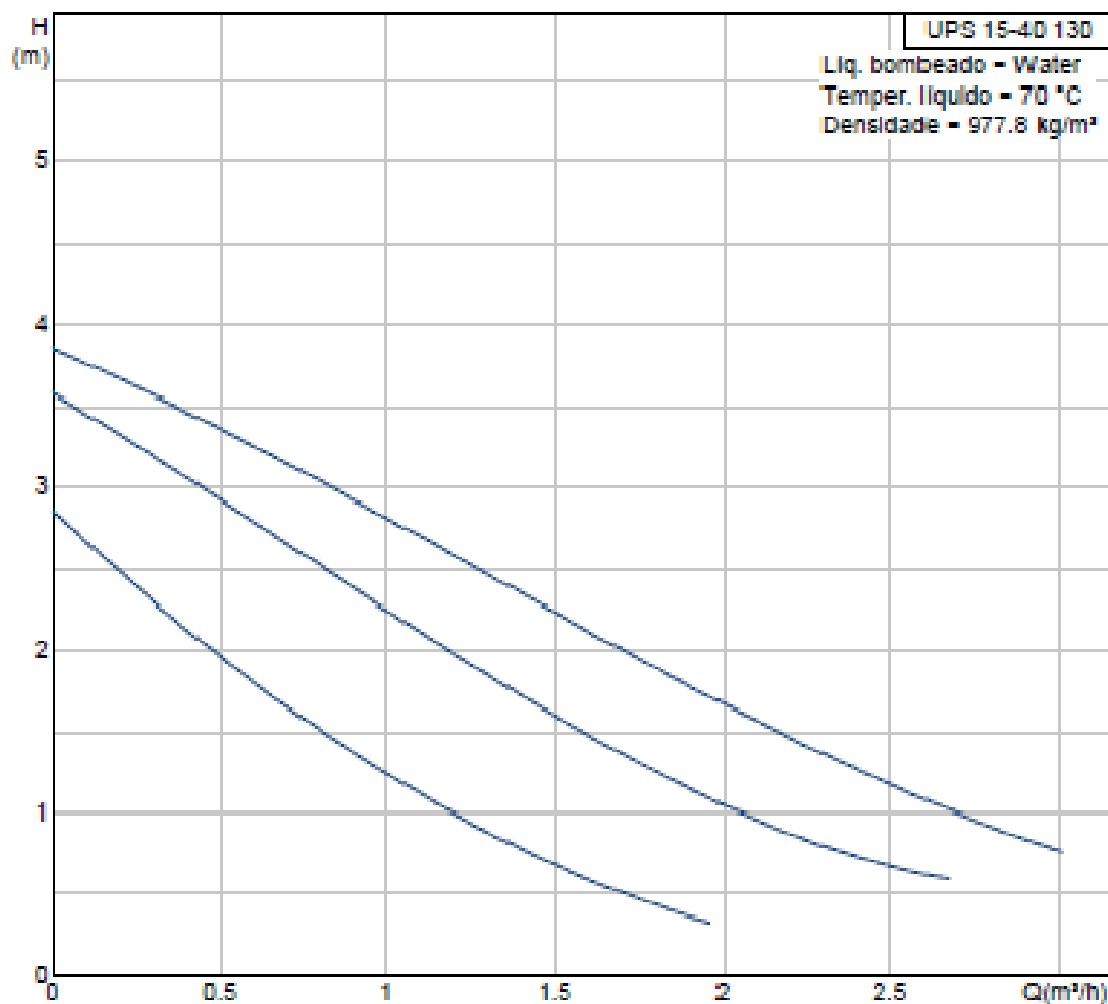
GRUNDFOS

1/3


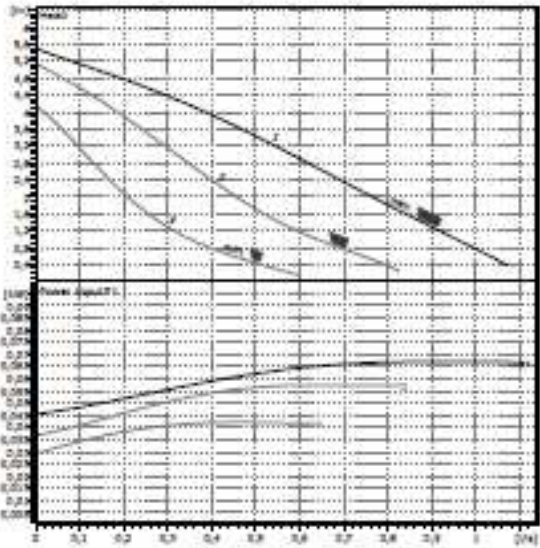
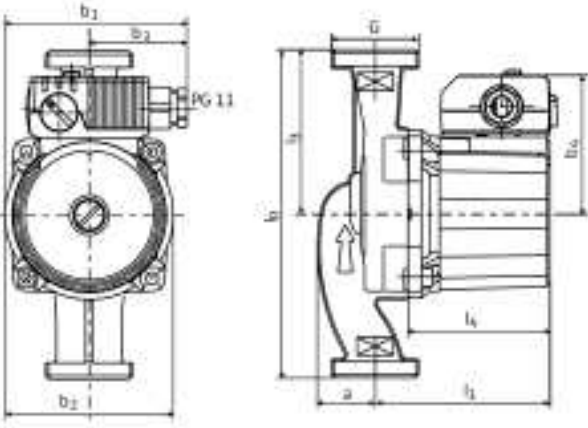
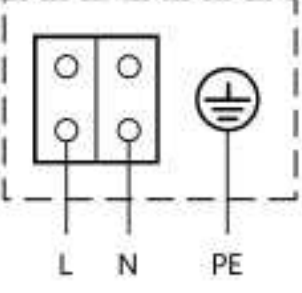



Nome empresa: -  
Criado por: -  
Telefone: -  
Fax: -  
Data: -

96281368 UPS 15-40 130 50 Hz



**Bomba Wilo**

WILO SE Northkirchenstr. 100 D 44263 Dortmund Phone 0231/4102-0 Fax 0231/4102-7363	<b>Star-RS 25/6</b> System: Standard pump																																				
Customer Customer no. Contact Care of	Project Project no. Position no. Location	Page 1 / 1 Date 26.06.2009																																			
		<b>Requested data</b> Flow 0 l/s Head 0 m Fluid Fluid temperature 0 K Density 998,3 kg/m³ Kinematic viscosity 1,005 mm²/s Vapor pressure 0 kPa																																			
		<b>Pump data</b> Make WILO Type Star-RS 25/6 Pump type Single head pump Operating type 1 Pressure rating PN10 Min. fluid temperature 263 K Max. fluid temperature 383 K																																			
 		<b>Hydraulic data (duty point)</b> Flow l/s Head m Power input P1 kW Power input * no. of pumps																																			
		<b>Minimum suction head</b> <table border="1"> <tr> <td>Temperature</td> <td>323</td> <td>366</td> <td>383</td> <td></td> <td></td> <td>K</td> </tr> <tr> <td>Minimum suction head</td> <td>0,5</td> <td>3</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td>m</td> </tr> </table>	Temperature	323	366	383			K	Minimum suction head	0,5	3	10			m																					
Temperature	323	366	383			K																															
Minimum suction head	0,5	3	10			m																															
		<b>Materials / Shaft seal</b> Housing Grade 14 cast iron Shaft X 40 Cr 13 Impeller Polypropylene Bearing Graphite																																			
		<b>Dimensions per pump</b> mm <table border="1"> <tr> <td>a</td> <td>33</td> <td>34</td> <td>79</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>b1</td> <td>100</td> <td>30</td> <td>180</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>b2</td> <td>92,5</td> <td>11</td> <td>97</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>b3</td> <td>54</td> <td>13</td> <td>90</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>b4</td> <td>75</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	a	33	34	79				b1	100	30	180				b2	92,5	11	97				b3	54	13	90				b4	75					
a	33	34	79																																		
b1	100	30	180																																		
b2	92,5	11	97																																		
b3	54	13	90																																		
b4	75																																				
		Suction side 1"/G 1 1/2 / PN10 Discharge side 1"/G 1 1/2 / PN10 Weight 2,4 kg																																			
		<b>Motordata per Motor/Pump/</b> Energy efficiency class C Rated power P2 0,039 kW Power input P1 0,08515 kW Nominal speed 2550 1/min Rated voltage 1~230 V/50 Hz Max. current 0,37 A Degree of protection IP 44 Permitted voltage tolerance +/- 10%																																			
		Item no. of standard version 4032956																																			

Reserve to change any technical data.

Software version 3.1.6 - 06.12.2008 (Build 20)

User group

Data status 1.1.2009

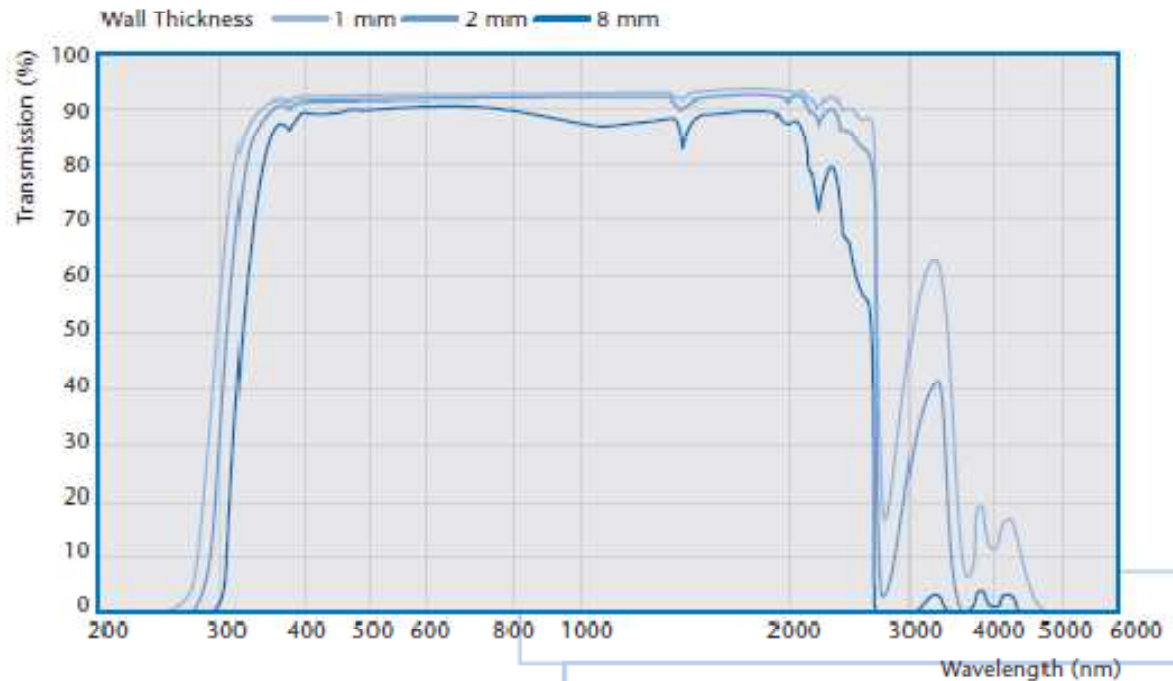
## Tubo de vidro

DURAN<sup>®</sup>






## Technical Data

GlassType/Application	Borosilicate glass 3.3 acc. to ISO 3585, chemically and thermally highly resistant General-purpose glass for apparatus for the chemical industry, for pipelines and lab glassware		
Physical Data	Coefficient of mean linear thermal expansion $\alpha$ (20°C;300°C) acc. to ISO 7991 ..... 3.3 $10^{-6}K^{-1}$ Transformation temperature $T_g$ ..... 525    °C Glass temperature at viscosity $\eta$ in dPa s $10^{13}$ (annealing point) ..... 560    °C $10^{7.8}$ (softening point) ..... 825    °C $10^4$ (working point) ..... 1260    °C Stress-optical coefficient K ..... 4.0 $10^{-6}mm^2 \cdot N^{-1}$ Density $\rho$ at 25°C ..... 2.23 $g \cdot cm^{-3}$ Modulus of elasticity E (Young's modulus) ..... 63 $10^3N \cdot mm^{-2}$ Poisson's ratio $\mu$ ..... 0.2 Thermal conductivity $\lambda_w$ at 90°C ..... 1.2 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ Log of the electric volume resistivity ( $\Omega \cdot cm$ ) at 250°C ..... 8.0 at 350°C ..... 6.5 $t_{100}$ ..... 250    °C Dielectric constant $\epsilon$ for 1 MHz at 25°C ..... 4.6 Dielectric loss factor $\tan \delta$ for 1 MHz at 25°C ..... 37 $10^{-4}$ Refractive index $n_d$ ( $\lambda = 587.6 \text{ nm}$ ) ..... 1.473		
Chemical Resistance	Hydrolytic resistance (ISO 719) ..... Class    HGB 1 Acid resistance (DIN 12116) ..... Class    S 1 Alkali resistance (ISO 695) ..... Class    A 2		
	The heavy metal content for the elements lead, cadmium, mercury and hexavalent chromium is below 100 ppm		

## Transmission

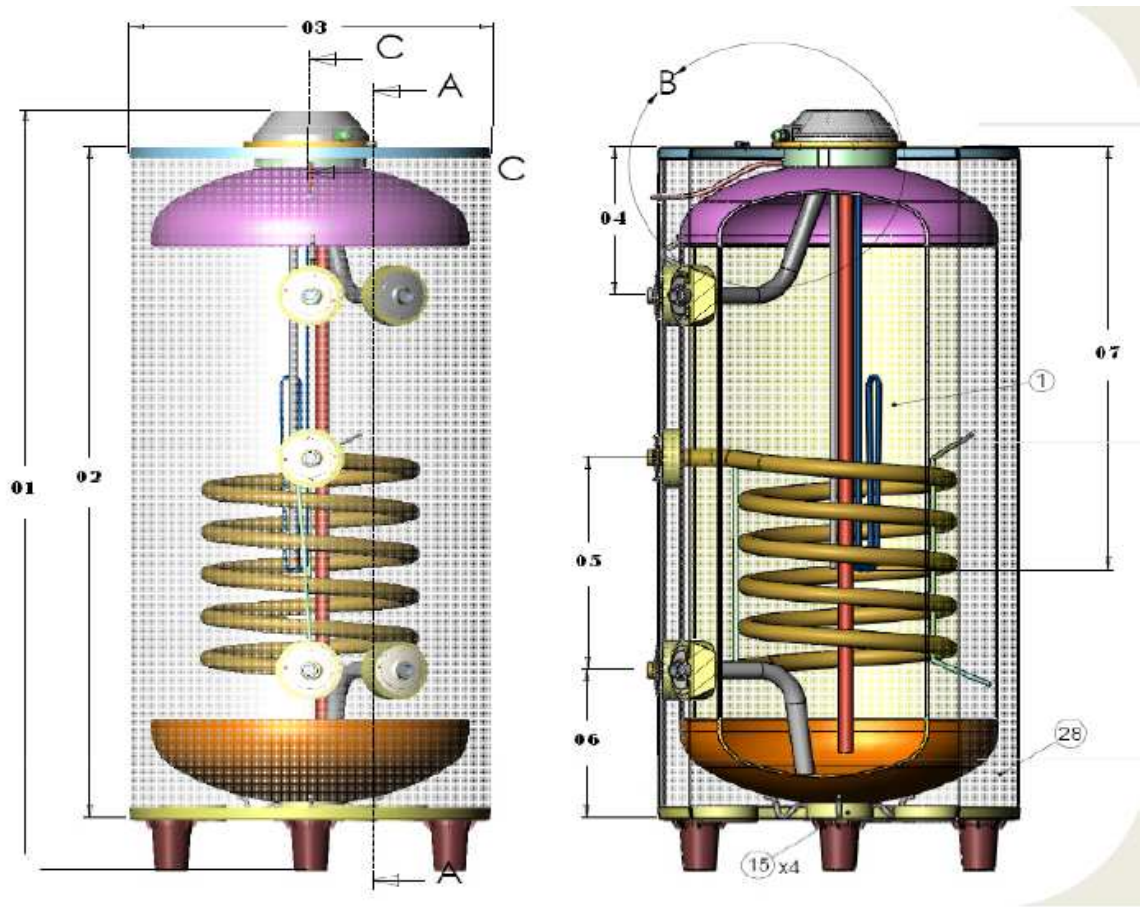


## SCHOTT DURAN®: Tubing

Outside Diameter	Wall Thickness	Weight per Length (Length approx. 1500 mm)	Carton Contents	
 mm	 mm	 g	 Number of Tubes	 Weight approx. kg
<b>30</b> ±0.40	1.4 ±0.10	421	36	15.2
	2.0 ±0.15	588	16	9.4
	2.8 ±0.20	800	16	12.8
<b>32</b> ±0.40	1.4 ±0.10	450	25	11.3
	2.0 ±0.15	630	16	10.1
	2.8 ±0.20	859	16	13.8
<b>33</b> ±0.40	2.0 ±0.15	651	25	16.2
<b>34</b> ±0.40	1.4 ±0.10	479	25	12.1
	2.0 ±0.15	672	16	10.8
	2.8 ±0.20	918	16	14.8
<b>36</b> ±0.45	1.4 ±0.10	509	25	12.6
	2.0 ±0.15	714	25	18.0
	2.8 ±0.20	976	12	11.7
<b>38</b> ±0.45	1.4 ±0.10	538	20	10.8
	2.0 ±0.15	756	20	15.0
	2.8 ±0.20	1035	9	9.4
<b>40</b> ±0.60	1.6 ±0.10	645	16	10.2
	2.3 ±0.20	911	16	14.6
	3.2 ±0.30	1237	9	11.2
	5.0 ±0.40	1838	9	16.5
<b>42</b> ±0.60	1.6 ±0.10	679	16	10.9
	2.3 ±0.20	959	16	15.3
	3.2 ±0.30	1304	9	11.7
<b>44</b> ±0.60	1.6 ±0.10	713	16	11.4
	2.3 ±0.20	1007	16	16.0
	3.2 ±0.30	1371	9	12.4
<b>45</b> ±0.70	5.0 ±0.40	2101	9	18.9
<b>46</b> ±0.70	1.6 ±0.10	746	16	11.9
	2.3 ±0.20	1056	9	9.5
	3.2 ±0.30	1439	9	13.0

Acumuladores

150l



CAPACIDAD (litros)	cota 01 (mm)	cota 02 (mm)	cota 03 (mm)	cota 04 (mm)	cota 05 (mm)	cota 06 (mm)	cota 07 (mm)	PESO (kg)	Intercambiador		RESIST. W
									S (m <sup>2</sup> )	Vol. (l)	
150	1.127,0	951,0	585,5	221,0	335,0	281,0	860,0	78	0,61	3,30	2.500

Figura 129 - Características do acumulador de 150l



## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

BST										
	Mod	Cod		Serp. 1		Serp. 2				
				m <sup>2</sup>	lt.	m <sup>2</sup>	lt.	Ø		
: +95°C	BST 200	A3E0L47 PGP40	200	0,70	5	0,50	4	600	1260	1.1/4" x 350
: +110°C	BST 300	A3E0L51 PGP40	300	1,20	8	0,75	5	650	1400	1.1/4" x 550
<b>P<sub>MAX</sub></b> : 10 bar	BST 400	A3E0L53 PGP40	400	1,40	9	0,90	6	750	1445	1.1/4" x 550
<b>P<sub>SCA</sub></b> : 12 bar	BST 500	A3E0L55 PGP40	500	1,80	12	0,90	6	750	1695	1.1/4" x 700
	BST 800	A3E0L60 PGP40	800	2,00	13	1,20	8	900	1785	1.1/4" x 700
	BST 1000	A3E0L62 PGP40	1000	2,40	15	1,20	8	900	2035	1.1/4" x 700
	BST 800 + FL Ø 310	A3E1L60 SWS50	800	2,00	13	1,20	8	900	1785	1.1/4" x 700
	BST 1000 + FL Ø 310	A3E1L62 SWS50	1000	2,40	15	1,20	8	900	2035	1.1/4" x 700

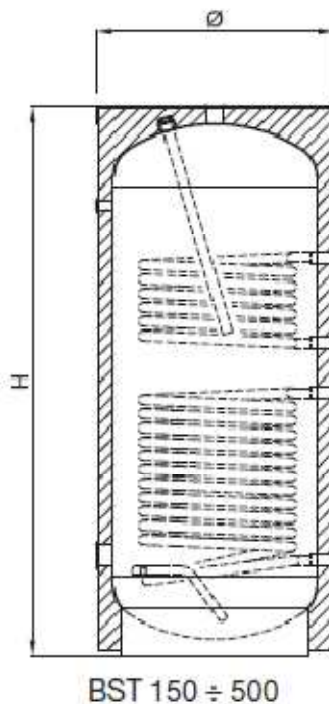


Figura 130 - Características do acumulador de 500l





## 11. Anexo B

Sistema de equações para modelação em EES (Engineering Equation Solver) dos vários protótipos.

### *Protótipo 1*

#### "Dados"

```
P_5=101 [kPa]
epsilon_4=0,002 [mm]
P_2=101 [kPa]
X_1=1,15 [m]
I=interpolate1('exterior';'Rad';'Hora';hora=tempo/3600)
F_3_1=0,7
epsilon_3=0,9
sigma=5,729*10^(-8)
T_10=15 [C]
X_2=0,0045 [m]
D_1=0,022 [m]
T_2=15 [C]
rho_1=0,90 [Kg/m^3]
cp_5=4190 [KJ/Kg-K]
epsilon_1=0,10
X_3=1,115 [m]
V_dep=150[l]
P_dep=101 [kPa]
epsilon_dep=0,5
passo=60 [s]
P_13=101 [kPa]
T_13_e=T_5_s
D_2=0,0204 [m]
Y_1=2,35 [m]
D_4=0,025 [m]
L_serp=15 [m]
lambda_14=0,035 [W/m-K]
v_2=7,5
alpha_1=100 [W/m^2-K]
epsilon_14=0,15
L_dep=0,951
D_15=0,5455
D_16=0,5855
lambda_16=0,025
lambda_cobre=350 [W/(m^2*K)]
hora=tempo/3600
```

#### "Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior do absorvedor"

```
call PipeFlow('water';T_5;P_5;m_dot;D_2;Y_1;epsilon_4/(D_2*1000):h_T_5; h_H_5 ;DELTAP_5;
Nusselt_T_5; f_5; Re_5)
alpha_4=h_H_5
```

#### "Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior da serpentina"

```
call PipeFlow('water';T_5;P_5;m_dot;D_4;L_serp;epsilon_4/(D_4*1000):h_T_13; h_H_13
;DELTAP_13; Nusselt_T_13; f_13; Re_13)
```

#### "Cálculo do caudal que circula no colector"

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

### "Bomba"

$m_{\dot{}} = Q_{\dot{}} * 998,2 / 3600$

$(\Delta T_5 + \Delta T_{13} + \Delta T_{\text{corrugado}}) * 1000 / (9,807 * 1000) = 0,0106 * Q_{\dot{}}^3 + 0,317 * Q_{\dot{}}^2 - 1,96 * Q_{\dot{}} + 2,85$  I Grundfos"

$(\Delta T_5 + \Delta T_{\text{corrugado}}) * 1000 / (9,807 * 1000) = 0,0933 * Q_{\dot{}}^3 - 0,206 * Q_{\dot{}}^2 - 1,23 * Q_{\dot{}} + 3,57$  II Grundfos"

$(\Delta T_5 + \Delta T_{\text{corrugado}}) * 1000 / (9,807 * 1000) = 0,0480 * Q_{\dot{}}^3 - 0,183 * Q_{\dot{}}^2 - 0,911 * Q_{\dot{}} + 3,85$  "III Grundfos"

### "Perda de carga no tubo corrugado"

call PipeFlow('water'; T<sub>5</sub>; P<sub>5</sub>; m<sub>dot</sub>; 0,016; 10; 0,005/0,016; h<sub>T</sub>\_corrugado; h<sub>H</sub>\_corrugado;  $\Delta T_{\text{corrugado}}$ ; Nusselt<sub>T</sub>\_corrugado; f<sub>corrugado</sub>; Re<sub>corrugado</sub>)

### "Cálculo do coeficiente de convecção no exterior do absorvedor"

Call External\_Flow\_Cylinder('air'; T<sub>2</sub>; T<sub>3</sub>; P<sub>2</sub>; v<sub>2</sub>; D<sub>1</sub>: F<sub>d</sub>L<sub>3</sub>; h<sub>3</sub>; C<sub>d</sub><sub>3</sub>; Nusselt<sub>3</sub>; Re<sub>3</sub>)

### "Convecção Forçada"

$\alpha_3 = h_3$

### "Considerações"

$T_3 = T_4$

$T_{5_e} = T_{13_s}$

### "Balanço térmico no absorvedor"

$Rad = I * (X_1 * Y_1 - D_4 * Y_1)$

$Q_{\text{rad}_3} = \epsilon_3 * \pi * D_1 / 2 * Y_1 * 5,27e-8 * ((T_3 + 273,15)^4 - (T_{10} + 273,15)^4)$

$Q_{\text{conv}_3} = \alpha_3 * (\pi * D_1 / 2 * Y_1) * (T_3 - T_2)$

$Rad * \epsilon_3 * \rho_1 = Q_{\text{rad}_3} + Q_{\text{conv}_3} + Q_{\text{conv}_4} + Q_{\text{cond}_3_7}$

$Q_{\text{conv}_4} = \alpha_4 * \pi * D_2 / 2 * Y_1 * (T_4 - T_5)$

$Q_{\text{conv}_4} = m_{\dot{}} * c_{p_5} * (T_{5_s} - T_{5_e})$

$T_5 = (T_{5_e} + T_{5_s}) / 2$

### "Balanço termico no isolamento do absorvedor"

### "Cálculo do coeficiente de convecção no exterior isolamento"

Call External\_Flow\_Cylinder('air'; T<sub>2</sub>; T<sub>14</sub>; P<sub>2</sub>; v<sub>2</sub>; D<sub>14</sub>: F<sub>d</sub><sub>14</sub>L; h<sub>14</sub>; C<sub>d</sub><sub>14</sub>; Nusselt<sub>14</sub>; Re<sub>14</sub>)

$\alpha_{14} = h_{14}$

$Q_{\text{cond}_3_7} = \lambda_{\text{cobre}} / (\pi / 2 * (D_1 + D_2) / 2) * ((D_1 - D_2) / 2 * Y_1) * (T_3 - T_7)$

$Q_{\text{conv}_7} = \alpha_4 * \pi * D_2 / 2 * Y_1 * (T_7 - T_5)$

$Q_{\text{cond}_3_7} = Q_{\text{conv}_7} + Q_{\text{cond}_14}$

$r_{\text{crit}_14} = \lambda_{14} / \alpha_{14}$

$D_{14} = r_{14}^2 + D_1$

$r_{14} = 0,04$

$Q_{\text{cond}_14} = (T_7 - T_{14}) * \lambda_{14} * \pi * Y_1 / \ln((D_{14} / 2) / (D_1 / 2))$

$Q_{\text{conv}_14} = Y_1 * \alpha_{14} * \pi * D_{14} / 2 * (T_{14} - T_2)$

$Q_{\text{rad}_14} = \pi * D_{14} / 2 * Y_1 * \epsilon_{14} * \sigma * ((273,15 + T_{14})^4 - (273,15 + T_9)^4)$

$\epsilon_{14} * \pi * D_{14} * Y_1 + Q_{\text{cond}_14} = Q_{\text{rad}_14} + Q_{\text{conv}_14}$

### "Temperatura exterior"

$T_1 = T_{10}$

$T_9 = 0,0552 * T_2^{1,5}$

### "Balanço térmico no depósito"

$\rho_{\text{dep}} = \text{Density}(\text{Water}; T = T_{\text{dep}_0}; P = P_{\text{dep}})$

$c_{p_{\text{dep}}} = C_p(\text{Water}; T = T_{\text{dep}_0}; P = P_{\text{dep}}) * 1000$

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

```

cp_13=Cp(Water;T=(T_13_e+T_13_s)/2;P=P_13)*1000
M_dep=V_dep*rho_dep/1000
linha=tempo/passo+1
T_dep_0=Tablevalue('table 1';linha-1;#T_dep)
epsilon_dep=(T_13_e-T_13_s)/(T_13_e-T_dep_0)
M_dep*cp_dep*dTdt=(T_13_e-T_13_s)*cp_13*m_dot-Q_conv_16_2
T_dep=T_dep_0+dTdt*passo
Call FC_plate_vertical('water'; T_15; T_dep; P_dep; L_dep: h_15; Nusselt_15; Ra_15)
Call External_Flow_Cylinder('air'; T_2; T_16; P_2; v_2; D_16: F_d\L_16; h_16; C_d_16; Nusselt_16;
Re_16)
alpha_15=h_15
alpha_16=h_16
Q_conv_dep_16=Q_cond_15_16
Q_cond_15_16=Q_conv_16_2
Q_conv_dep_16=alpha_15*(pi*D_15*L_dep+2*pi*D_15^2/4)*(T_dep-T_15)
Q_cond_15_16=lambda_16*2*pi*L_dep*(T_15-T_16)/ln((D_16/2)/(D_15/2))

      Q_conv_16_2=alpha_16*(pi*D_16*L_dep+2*pi*D_16^2/4)*(T_16-T_2)

```

**Protótipo 1 com diferença de temperatura logaritmica**

"Dados"

P\_5=101 [kPa]  
epsilon\_4=0,002 [mm]  
P\_2=101 [kPa]  
X\_1=1,15 [m]  
l=800  
F\_3\_1=0,7  
epsilon\_3=0,9  
sigma=5,729\*10<sup>-8</sup>  
T\_10=15 [C]  
X\_2=0,0045 [m]  
D\_1=0,022 [m]  
T\_2=15 [C]  
rho\_1=0,90 [Kg/m<sup>3</sup>]  
cp\_5=4190 [KJ/Kg-K]  
epsilon\_1=0,10  
X\_3=1,115 [m]  
V\_dep=150[l]  
P\_dep=101 [kPa]  
epsilon\_dep=1  
passo=60 [s]  
P\_13=101 [kPa]  
T\_13\_e=T\_5\_s  
D\_2=0,0204 [m]  
Y\_1=2,35 [m]  
D\_4=0,025 [m]  
L\_serp=15 [m]  
lambda\_14=0,035 [W/m-K]  
v\_2=7,5  
alpha\_1=100 [W/m<sup>2</sup>-K]  
epsilon\_14=0,15  
L\_dep=0,951  
D\_15=0,5455  
D\_16=0,5855  
lambda\_16=0,025  
lambda\_cobre=350 [W/(m<sup>2</sup>\*K)]  
hora=tempo/3600

"Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior do absorvedor"

call PipeFlow('water';T\_5;P\_5;m\_dot;D\_2;Y\_1;epsilon\_4/(D\_2\*1000):h\_T\_5; h\_H\_5 ;DELTAP\_5;  
Nusselt\_T\_5; f\_5; Re\_5)  
alpha\_4=h\_H\_5

"Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior da serpentina"

call PipeFlow('water';T\_5;P\_5;m\_dot;D\_4;L\_serp;epsilon\_4/(D\_4\*1000):h\_T\_13; h\_H\_13  
;DELTAP\_13; Nusselt\_T\_13; f\_13; Re\_13)

"Cálculo do caudal que circula no colector"

"Bomba"

m\_dot=Q\_dot\*998,2/3600  
(DELTAP\_5+DELTAP\_corrugado)\*1000/(9,807\*1000)=0,0933\*Q\_dot<sup>3</sup>-0,206\*Q\_dot<sup>2</sup>-  
1,23\*Q\_dot+3,57 " II Grundfos"

"Perda de carga no tubo corrugado"

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

```
call PipeFlow('water';T_5;P_5;m_dot;0,016;10;0,005/0,016:h_T_corrugado; h_H_corrugado
;DELTA_P_corrugado; Nusselt_T_corrugado; f_corrugado; Re_corrugado)
```

### "Cálculo do coeficiente de convecção no exterior do absorvedor"

```
Call External_Flow_Cylinder('air'; T_2;T_3; P_2; v_2; D_1: F_d\L_3; h_3; C_d_3; Nusselt_3; Re_3)
```

### "Convecção Forçada"

```
alpha_3=h_3
```

### "Considerações"

```
T_3=T_4
```

```
T_5_e=T_13_s
```

### "Balanço térmico no absorvedor"

```
Rad=I*(X_1*Y_1-D_4*Y_1)
```

```
Q_rad_3=epsilon_3*pi*D_1/2*Y_1*5,27e-8*((T_3+273,15)^4-(T_10+273,15)^4)
```

```
Q_conv_3=alpha_3*(pi*D_1/2*Y_1)*(T_3-T_2)
```

```
Rad*epsilon_3*rho_1=Q_rad_3+Q_conv_3+Q_conv_4+Q_cond_3_7
```

```
Q_conv_4=alpha_4*pi*D_2/2*Y_1*teta_ln_4
```

```
Q_conv_4=m_dot*cp_5*(T_5_s-T_5_e)
```

```
teta_ln_4=(T_5_s-T_5_e)/ln((T_4-T_5_e)/(T_4-T_5_s))
```

```
T_5=T_4-teta_ln_4
```

### "Balanço termico no isolamento do absorvedor"

### "Cálculo do coeficiente de convecção no exterior isolamento"

```
Call External_Flow_Cylinder('air'; T_2; T_14; P_2; v_2; D_14: F_d_14\L; h_14; C_d_14; Nusselt_14;
Re_14)
```

```
alpha_14=h_14
```

```
Q_cond_3_7=lambda_cobre/(pi/2*(D_1+D_2)/2)*((D_1-D_2)/2*Y_1)*(T_3-T_7)
```

```
Q_conv_7=alpha_4*pi*D_2/2*Y_1*teta_ln_7
```

```
teta_ln_7=(T_5_s-T_5_e)/ln((T_7-T_5_e)/(T_7-T_5_s))
```

```
Q_cond_3_7=Q_conv_7+Q_cond_14
```

```
r_crit_14=lambda_14/alpha_14
```

```
D_14=r_14^2+D_1
```

```
r_14=0,04
```

```
Q_cond_14=(T_7-T_14)*lambda_14*pi*Y_1/ln((D_14/2)/(D_1/2))
```

```
Q_conv_14=Y_1*alpha_14*pi*D_14/2*(T_14-T_2)
```

```
Q_rad_14=pi*D_14/2*Y_1*epsilon_14*sigma*((273,15+T_14)^4-(273,15+T_9)^4)
```

```
epsilon_14*pi*D_14*Y_1+Q_cond_14=Q_rad_14+Q_conv_14
```

### "Temperatura exterior"

```
T_1=T_10
```

```
T_9=0,0552*T_2^1,5
```

### "Balanço térmico no depósito"

```
rho_dep=Density(Water;T=T_dep_0;P=P_dep)
```

```
cp_dep=Cp(Water;T=T_dep_0;P=P_dep)*1000
```

```
cp_13=Cp(Water;T=(T_13_e+T_13_s)/2;P=P_13)*1000
```

```
M_dep=V_dep*rho_dep/1000
```

```
linha=tempo/passo+1
```

```
T_dep_0=Tablevalue('table 1';linha-1;#T_dep)
```

```
epsilon_dep=(T_13_e-T_13_s)/(T_13_e-T_dep_0)
```

```
M_dep*cp_dep*dTdt=(T_13_e-T_13_s)*cp_13*m_dot-Q_conv_16_2
```

```
T_dep=T_dep_0+dTdt*passo
```

```
Call FC_plate_vertical('water'; T_15; T_dep; P_dep; L_dep: h_15; Nusselt_15; Ra_15)
```

```
Call External_Flow_Cylinder('air'; T_2; T_16; P_2; v_2; D_16: F_d\L_16; h_16; C_d_16; Nusselt_16;
Re_16)
```

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

```
alpha_15=h_15  
alpha_16=h_16  
Q_conv_dep_16=Q_cond_15_16  
Q_cond_15_16=Q_conv_16_2  
Q_conv_dep_16=alpha_15*(pi*D_15*L_dep+2*pi*D_15^2/4)*(T_dep-T_15)  
Q_cond_15_16=lambda_16*2*pi*L_dep*(T_15-T_16)/ln((D_16/2)/(D_15/2))  
  
Q_conv_16_2=alpha_16*(pi*D_16*L_dep+2*pi*D_16^2/4)*(T_16-T_2)
```

## Protótipo 2

### "Dados"

```
P_5=101 [kPa]
epsilon_4=0,002 [mm]
P_2=101 [kPa]
X_1=1,05 [m]
l=interpolate1('exterior';'Rad';'Hora';hora=tempo/3600)/
F_3_1=0,7
epsilon_3=0,9
sigma=5,729*10^(-8)
T_10=15 [C]
X_2=0,0045 [m]
D_1=0,022 [m]
T_2=15 [C]
rho_1=0,9 [Kg/m^3]
cp_5=4190 [KJ/Kg-K]
epsilon_1=0,1
X_3=1,250 [m]
V_dep=150[l]          P_dep=101 [kPa]
epsilon_dep=0,5
passo=60 [s]
P_13=101 [kPa]
T_13_e=T_5_s
D_2=0,0204 [m]
Y_1=2,35 [m]
D_4=0,025 [m]
L_serp=15 [m]
lambda_14=0,035 [W/m-K]
v_2=7,5
alpha_1=100 [W/m^2-K]
epsilon_14=0,1
L_dep=0,951
D_15=0,5455
D_16=0,5855
lambda_16=0,025
lambda_cobre=350 [W/(m^2*K)]
hora=tempo/3600
```

### "Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior do absorvedor"

```
call PipeFlow('water';T_5;P_5;m_dot;D_2;Y_1;epsilon_4/(D_2*1000):h_T_5; h_H_5 ;DELTA_P_5;
Nusselt_T_5; f_5; Re_5)
alpha_4=h_H_5
```

### "Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior da serpentina"

```
call PipeFlow('water';T_5;P_5;m_dot;D_4;L_serp;epsilon_4/(D_4*1000):h_T_13; h_H_13
;DELTA_P_13; Nusselt_T_13; f_13; Re_13)
```

### "Cálculo do caudal que circula no colector"

#### "Bomba"

```
m_dot=Q_dot*998,2/3600
(DELTA_P_5+DELTA_P_corrugado)*1000/(9,807*1000)=0,0480*Q_dot^3-0,183*Q_dot^2-
0,911*Q_dot+3,85    "II Grundfos"
```

### "Cálculo da perda de carga no tubo corrugado"

```
call PipeFlow('water';T_5;P_5;m_dot;0,016;10;0,005/0,016:h_T_corrugado; h_H_corrugado
;DELTA_P_corrugado; Nusselt_T_corrugado; f_corrugado; Re_corrugado)
```

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

### "Cálculo do coeficiente de convecção no exterior do absorvedor"

Call External\_Flow\_Cylinder('air'; T\_2; T\_3; P\_2; v\_2; D\_1: F\_d\L\_3; h\_3; C\_d\_3; Nusselt\_3; Re\_3)

### "Convecção Forçada"

$\alpha_3 = h_3$

### "Considerações"

$T_3 = T_4$

$T_{5_e} = T_{13_s}$

### "Balanço térmico no absorvedor"

$Rad = I \cdot X_1 \cdot Y_1$

$F_{3_{10}} = 1 - F_{3_1}$

$Q_{rad_3} = \epsilon_3 \pi D_1 Y_1 5,27e-8 ((T_3 + 273,15)^4 - (T_{10} + 273,15)^4)$

$Q_{conv_3} = \alpha_3 (2 \pi X_2 + \pi D_1 / 2) (T_3 - T_2)$

$Rad \cdot \epsilon_3 \cdot \rho_1 = Q_{rad_3} + Q_{conv_3} + Q_{conv_4} + Q_{cond_{3_7}}$

$Q_{conv_4} = \alpha_4 \pi D_2 Y_1 (T_4 - T_5)$

$Q_{conv_4} = \dot{m} \cdot c_{p_5} (T_{5_s} - T_{5_e})$

$T_5 = (T_{5_e} + T_{5_s}) / 2$

$\alpha_3 = \alpha_7$

$\epsilon_3 = \epsilon_7$

$Q_{cond_{3_7}} = \lambda_{cobre} / (\pi ((D_1 + D_2) / 2) ((D_1 - D_2) Y_1) (T_3 - T_7))$

$Q_{conv_7} = \alpha_4 \pi D_2 Y_1 (T_7 - T_5)$

$Q_{conv_{7_{ext}}} = \alpha_7 \pi D_1 Y_1 (T_7 - T_2)$

$Q_{rad_7} = \epsilon_7 5,27e-8 ((T_7 + 273,15)^4 - (T_9 + 273,15)^4)$

$Q_{cond_{3_7}} + I \cdot D_1 \cdot Y_1 \cdot \epsilon_7 = Q_{rad_7} + Q_{conv_{7_{ext}}} + Q_{conv_7}$

### "Temperaturas do exterior"

$T_1 = T_{10}$

$T_9 = 0,0552 \cdot T_2^{1,5}$

### "Balanço térmico no depósito"

$\rho_{dep} = \text{Density}(\text{Water}; T = T_{dep_0}; P = P_{dep})$

$c_{p_{dep}} = Cp(\text{Water}; T = T_{dep_0}; P = P_{dep}) \cdot 1000$

$c_{p_{13}} = Cp(\text{Water}; T = (T_{13_e} + T_{13_s}) / 2; P = P_{13}) \cdot 1000$

$M_{dep} = V_{dep} \cdot \rho_{dep} / 1000$

linha = tempo / passo + 1

$T_{dep_0} = \text{Tablevalue}('table_1'; \text{linha} - 1; \#T_{dep})$

$\epsilon_{dep} = (T_{13_e} - T_{13_s}) / (T_{13_e} - T_{dep_0})$

$M_{dep} \cdot c_{p_{dep}} \cdot dT/dt = (T_{13_e} - T_{13_s}) \cdot c_{p_{13}} \cdot \dot{m} - Q_{conv_{16_2}}$

$T_{dep} = T_{dep_0} + dT/dt \cdot \text{passo}$

Call FC\_plate\_vertical('water'; T\_15; T\_dep; P\_dep; L\_dep: h\_15; Nusselt\_15; Ra\_15)

Call External\_Flow\_Cylinder('air'; T\_2; T\_16; P\_2; v\_2; D\_16: F\_d\L\_16; h\_16; C\_d\_16; Nusselt\_16; Re\_16)

$\alpha_{15} = h_{15}$

$\alpha_{16} = h_{16}$

$Q_{conv_{dep_{16}}} = Q_{cond_{15_{16}}}$

$Q_{cond_{15_{16}}} = Q_{conv_{16_2}}$

$Q_{conv_{dep_{16}}} = \alpha_{15} (\pi D_{15} L_{dep} + 2 \pi D_{15}^2 / 4) (T_{dep} - T_{15})$

$Q_{cond_{15_{16}}} = \lambda_{16} 2 \pi L_{dep} (T_{15} - T_{16}) / \ln((D_{16} / 2) / (D_{15} / 2))$

$Q_{conv_{16_2}} = \alpha_{16} (\pi D_{16} L_{dep} + 2 \pi D_{16}^2 / 4) (T_{16} - T_2)$



**Protótipo 4 (500l)**

"Dados"

P\_5=101 [kPa]  
epsilon\_4=0,002 [mm]  
P\_2=101 [kPa]  
X\_1=1,05 [m]  
l=800  
F\_3\_1=0,7  
epsilon\_3=0,9  
sigma=5,729\*10<sup>(-8)</sup>  
T\_10=20 [C]  
X\_2=0,0045 [m]  
D\_1=0,022 [m]  
T\_2=23 [C]  
rho\_1=0,9 [Kg/m<sup>3</sup>]  
cp\_5=4190 [KJ/Kg-K]  
epsilon\_1=0,1  
X\_3=1,250 [m]  
V\_dep=500[l]  
P\_dep=101 [kPa]  
epsilon\_dep=1  
passo=60 [s]  
P\_13=101 [kPa]  
T\_13\_e=T\_5\_s  
D\_2=0,0204 [m]  
Y\_1=2,35 [m]  
D\_4=0,025 [m]  
L\_serp=15 [m]  
lambda\_14=0,035 [W/m-K]  
v\_2=interpolate1('exterior';'vento';'Hora';hora=tempo/3600)  
alpha\_1=100 [W/m<sup>2</sup>-K]  
epsilon\_14=0,1  
L\_dep=1,695  
D\_15=0,65  
D\_16=0,73  
lambda\_16=0,025  
lambda\_cobre=350 [W/(m<sup>2</sup>\*K)]  
hora=tempo/3600

"Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior do absorvedor"

call PipeFlow('water';T\_5;P\_5;m\_dot;D\_2;Y\_1;epsilon\_4/(D\_2\*1000):h\_T\_5; h\_H\_5 ;DELTAP\_5;  
Nusselt\_T\_5; f\_5; Re\_5)  
alpha\_4=h\_H\_5

"Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior da serpentina"

call PipeFlow('water';T\_5;P\_5;m\_dot;D\_4;L\_serp;epsilon\_4/(D\_4\*1000):h\_T\_13; h\_H\_13  
;DELTAP\_13; Nusselt\_T\_13; f\_13; Re\_13)

"Cálculo do caudal que circula no colector"

"Bomba"

m\_dot=Q\_dot\*998,2/3600  
(DELTAP\_5+DELTAP\_corrugado)\*1000/(9,807\*1000)=0,0933\*Q\_dot^3-0,206\*Q\_dot^2-  
1,23\*Q\_dot+3,57 " II Grundfos"

"Cálculo da perda de carga no tubo corrugado"

call PipeFlow('water';T\_5;P\_5;m\_dot;0,018;15;0,002/0,018:h\_T\_corrugado; h\_H\_corrugado  
;DELTAP\_corrugado; Nusselt\_T\_corrugado; f\_corrugado; Re\_corrugado)

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

### "Cálculo do coeficiente de convecção no exterior do absorvedor"

Call External\_Flow\_Cylinder('air'; T\_2; T\_3; P\_2; v\_2; D\_1: F\_d\L\_3; h\_3; C\_d\_3; Nusselt\_3; Re\_3)

### "Convecção Forçada"

$\alpha_3 = h_3$

### "Considerações"

$T_3 = T_4$

$T_{5_e} = T_{13_s}$

### "Balanço térmico no absorvedor"

$Rad = I \cdot X_1 \cdot Y_1$

$F_{3_{10}} = 1 - F_{3_1}$

$Q_{rad_3} = \epsilon_3 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot Y_1 \cdot 5,27e-8 \cdot ((T_3 + 273,15)^4 - (T_{10} + 273,15)^4)$

$Q_{conv_3} = \alpha_3 \cdot (\pi \cdot X_2 + \pi \cdot D_1/2) \cdot (T_3 - T_2)$

$Rad \cdot \epsilon_3 \cdot \rho_1 = Q_{rad_3} + Q_{conv_3} + Q_{conv_4} + Q_{cond_3_7}$

$Q_{conv_4} = \alpha_4 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot Y_1 \cdot (T_4 - T_5)$

$Q_{conv_4} = m_{dot} \cdot c_{p_5} \cdot (T_{5_s} - T_{5_e})$

$T_5 = (T_{5_e} + T_{5_s})/2$

### "Balanço térmico no isolamento do absorvedor"

#### "Cálculo do coeficiente de convecção no exterior isolamento"

Call External\_Flow\_Cylinder('air'; T\_2; T\_14; P\_2; v\_2; D\_14: F\_d\_14\L; h\_14; C\_d\_14; Nusselt\_14; Re\_14)

$\alpha_{14} = h_{14}$

$Q_{cond_3_7} = \lambda_{cobre} / (\pi/2 \cdot (D_1 + D_2)/2) \cdot ((D_1 - D_2)/2 \cdot Y_1) \cdot (T_3 - T_7)$

$Q_{conv_7} = \alpha_4 \cdot \pi \cdot D_2/2 \cdot Y_1 \cdot (T_7 - T_5)$

$Q_{cond_3_7} = Q_{conv_7} + Q_{cond_14}$

$r_{crit_14} = \lambda_{14} / \alpha_{14}$

$D_{14} = r_{14}^2 + D_1$

$r_{14} = 0,04$

$Q_{cond_14} = (T_7 - T_{14}) \cdot \lambda_{14} \cdot \pi \cdot Y_1 / \ln((D_{14}/2)/(D_1/2))$

$Q_{conv_14} = Y_1 \cdot \alpha_{14} \cdot \pi \cdot D_{14}/2 \cdot (T_{14} - T_2)$

$Q_{rad_14} = \pi \cdot D_{14}/2 \cdot Y_1 \cdot \epsilon_{14} \cdot \sigma \cdot ((273,15 + T_{14})^4 - (273,15 + T_9)^4)$

$\epsilon_{14} \cdot I \cdot \pi \cdot D_{14} \cdot Y_1 + Q_{cond_14} = Q_{rad_14} + Q_{conv_14}$

### "Temperaturas exteriores"

$T_1 = T_{10}$

$T_9 = 0,0552 \cdot T_2^{1,5}$

### "Balanço térmico no depósito"

$\rho_{dep} = \text{Density}(\text{Water}; T = T_{dep_0}; P = P_{dep})$

$c_{p_{dep}} = C_p(\text{Water}; T = T_{dep_0}; P = P_{dep}) \cdot 1000$

$c_{p_{13}} = C_p(\text{Water}; T = (T_{13_e} + T_{13_s})/2; P = P_{13}) \cdot 1000$

$M_{dep} = V_{dep} \cdot \rho_{dep} / 1000$

$linha = tempo / passo + 1$

$T_{dep_0} = \text{Tablevalue}('table_1'; linha - 1; \#T_{dep})$

$\epsilon_{dep} = (T_{13_e} - T_{13_s}) / (T_{13_e} - T_{dep_0})$

$M_{dep} \cdot c_{p_{dep}} \cdot dT/dt = (T_{13_e} - T_{13_s}) \cdot c_{p_{13}} \cdot m_{dot} - Q_{conv_{16_2}}$

$T_{dep} = T_{dep_0} + dT/dt \cdot passo$

Call FC\_plate\_vertical('water'; T\_15; T\_dep; P\_dep; L\_dep: h\_15; Nusselt\_15; Ra\_15)

Call External\_Flow\_Cylinder('air'; T\_2; T\_16; P\_2; v\_2; D\_16: F\_d\L\_16; h\_16; C\_d\_16; Nusselt\_16; Re\_16)

$\alpha_{15} = h_{15}$

$\alpha_{16} = h_{16}$

$Q_{conv_{dep_16}} = Q_{cond_{15_16}}$

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

$$Q_{\text{cond\_15\_16}} = Q_{\text{conv\_16\_2}}$$

$$Q_{\text{conv\_dep\_16}} = \alpha_{15} (\pi D_{15} L_{\text{dep}} + 2\pi D_{15}^2/4) (T_{\text{dep}} - T_{15})$$

$$Q_{\text{cond\_15\_16}} = \lambda_{16} 2\pi L_{\text{dep}} (T_{15} - T_{16}) / \ln((D_{16}/2)/(D_{15}/2))$$

$$Q_{\text{conv\_16\_2}} = \alpha_{16} (\pi D_{16} L_{\text{dep}} + 2\pi D_{16}^2/4) (T_{16} - T_2)$$

$$\eta = (T_{13\_e} - T_{13\_s}) \cdot c_{p\_13} \cdot \dot{m}_{\text{dot}} / (800 \cdot 1,2 \cdot 2,35) \cdot 100$$

**Protótipo 4 (150l)**

"Dados"

```
P_5=101 [kPa]
epsilon_4=0,002 [mm]
P_2=101 [kPa]
X_1=1,05 [m]
l=800
F_3_1=0,7
epsilon_3=0,9
sigma=5,729*10^(-8)
X_2=0,0045 [m]
D_1=0,022 [m]
rho_1=0,9 [Kg/m^3]
cp_5=4190 [KJ/Kg-K]
epsilon_1=0,1
X_3=1,250 [m]
V_dep=150[l]
P_dep=101 [kPa]
epsilon_dep=1
passo=60 [s]
P_13=101 [kPa]
T_13_e=T_5_s
D_2=0,0204 [m]
Y_1=2,35 [m]
D_4=0,025 [m]
L_serp=15 [m]
lambda_14=0,035 [W/m-K]
v_2=interpolate1('exterior','vento','Hora';hora=tempo/3600)
T_2=T_10
T_10=interpolate1('exterior','T_a';'Hora';hora=tempo/3600)
alpha_1=100 [W/m^2-K]
epsilon_14=0,1
L_dep=0,95
D_15=0,48
D_16=0,56
lambda_16=0,025
lambda_cobre=350 [W/(m^2*K)]
hora=tempo/3600
```

"Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior do absorvedor"

```
call PipeFlow('water';T_5;P_5;m_dot;D_2;Y_1;epsilon_4/(D_2*1000):h_T_5; h_H_5 ;DELTA_P_5;
Nusselt_T_5; f_5; Re_5)
alpha_4=h_H_5
```

"Cálculo do caudal que circula no colector"

"Bomba"

```
m_dot=Q_dot*998,2/3600
(DELTA_P_5+DELTA_P_corrugado)*1000/(9,807*1000)=0,0480*Q_dot^3-0,183*Q_dot^2-
0,911*Q_dot+3,85 "III Grundfos"
```

"Cálculo da perda de carga no tubo corrugado"

```
call PipeFlow('water';T_5;P_5;m_dot;0,018;15;0,002/0,018:h_T_corrugado; h_H_corrugado
;DELTA_P_corrugado; Nusselt_T_corrugado; f_corrugado; Re_corrugado)
```

"Cálculo do coeficiente de convecção no exterior do absorvedor"

```
Call External_Flow_Cylinder('air'; T_2;T_3; P_2; v_2; D_1: F_d\L_3; h_3; C_d_3; Nusselt_3; Re_3)
"Convecção Forçada"
```

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

$\alpha_3 = h_3$

### "Considerações"

$T_3 = T_4$

$T_{5_e} = T_{13_s}$

### "Balanço térmico no absorvedor"

$Rad = I \cdot X_1 \cdot Y_1$

$F_{3_{10}} = 1 - F_{3_1}$

$Q_{rad_3} = \epsilon_3 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot Y_1 \cdot 5,27e-8 \cdot ((T_3 + 273,15)^4 - (T_{10} + 273,15)^4)$

$Q_{conv_3} = \alpha_3 \cdot (2 \cdot X_2 + \pi \cdot D_1 / 2) \cdot (T_3 - T_2)$

$Rad \cdot \epsilon_3 \cdot \rho_1 = Q_{rad_3} + Q_{conv_3} + Q_{conv_4} + Q_{cond_3_7}$

$Q_{conv_4} = \alpha_4 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot Y_1 \cdot (T_4 - T_5)$

$Q_{conv_4} = m_{dot} \cdot c_{p_5} \cdot (T_{5_s} - T_{5_e})$

$T_5 = (T_{5_e} + T_{5_s}) / 2$

### "Balanço termico no isolamento do absorvedor"

#### "Cálculo do coeficiente de convecção no exterior isolamento"

Call External\_Flow\_Cylinder('air';  $T_2$ ;  $T_{14}$ ;  $P_2$ ;  $v_2$ ;  $D_{14}$ :  $F_{d_{14}}/L_{14}$ ;  $h_{14}$ ;  $C_{d_{14}}$ ; Nusselt\_14; Re\_14)

$\alpha_{14} = h_{14}$

$Q_{cond_3_7} = \lambda_{cobre} / (\pi / 2 \cdot (D_1 + D_2) / 2) \cdot ((D_1 - D_2) / 2 \cdot Y_1) \cdot (T_3 - T_7)$

$Q_{conv_7} = \alpha_4 \cdot \pi \cdot D_2 / 2 \cdot Y_1 \cdot (T_7 - T_5)$

$Q_{cond_3_7} = Q_{conv_7} + Q_{cond_{14}}$

$r_{crit_{14}} = \lambda_{14} / \alpha_{14}$

$D_{14} = r_{14}^2 + D_1$

$r_{14} = 0,04$

$Q_{cond_{14}} = (T_7 - T_{14}) \cdot \lambda_{14} \cdot \pi \cdot Y_1 / \ln((D_{14}/2) / (D_1/2))$

$Q_{conv_{14}} = Y_1 \cdot \alpha_{14} \cdot \pi \cdot D_{14} / 2 \cdot (T_{14} - T_2)$

$Q_{rad_{14}} = \pi \cdot D_{14} / 2 \cdot Y_1 \cdot \epsilon_{14} \cdot \sigma \cdot ((273,15 + T_{14})^4 - (273,15 + T_9)^4)$

$\epsilon_{14} \cdot \pi \cdot D_{14} \cdot Y_1 + Q_{cond_{14}} = Q_{rad_{14}} + Q_{conv_{14}}$

### "Temperaturas exteriores"

$T_1 = T_{10}$

$T_9 = 0,0552 \cdot T_2^{1,5}$

### "Balanço térmico no deposito"

$\rho_{dep} = \text{Density}(\text{Water}; T = T_{dep_0}; P = P_{dep})$

$c_{p_{dep}} = \text{Cp}(\text{Water}; T = T_{dep_0}; P = P_{dep}) \cdot 1000$

$c_{p_{13}} = \text{Cp}(\text{Water}; T = (T_{13_e} + T_{13_s}) / 2; P = P_{13}) \cdot 1000$

$M_{dep} = V_{dep} \cdot \rho_{dep} / 1000$

$linha = tempo / passo + 1$

$T_{dep_0} = \text{Tablevalue}('table_1'; linha - 1; \#T_{dep})$

$\epsilon_{dep} = (T_{13_e} - T_{13_s}) / (T_{13_e} - T_{dep_0})$

$M_{dep} \cdot c_{p_{dep}} \cdot dT/dt = (T_{13_e} - T_{13_s}) \cdot c_{p_{13}} \cdot m_{dot} - Q_{conv_{16_2}}$

$T_{dep} = T_{dep_0} + dT/dt \cdot passo$

Call FC\_plate\_vertical('water';  $T_{15}$ ;  $T_{dep}$ ;  $P_{dep}$ ;  $L_{dep}$ :  $h_{15}$ ; Nusselt\_15; Ra\_15)

Call External\_Flow\_Cylinder('air';  $T_2$ ;  $T_{16}$ ;  $P_2$ ;  $v_2$ ;  $D_{16}$ :  $F_{d_{16}}/L_{16}$ ;  $h_{16}$ ;  $C_{d_{16}}$ ; Nusselt\_16; Re\_16)

$\alpha_{15} = h_{15}$

$\alpha_{16} = h_{16}$

$Q_{conv_{dep_{16}}} = Q_{cond_{15_{16}}}$

$Q_{cond_{15_{16}}} = Q_{conv_{16_2}}$

$Q_{conv_{dep_{16}}} = \alpha_{15} \cdot (\pi \cdot D_{15} \cdot L_{dep} + 2 \cdot \pi \cdot D_{15}^2 / 4) \cdot (T_{dep} - T_{15})$

$Q_{cond_{15_{16}}} = \lambda_{16} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L_{dep} \cdot (T_{15} - T_{16}) / \ln((D_{16}/2) / (D_{15}/2))$

$Q_{conv_{16_2}} = \alpha_{16} \cdot (\pi \cdot D_{16} \cdot L_{dep} + 2 \cdot \pi \cdot D_{16}^2 / 4) \cdot (T_{16} - T_2)$

$\eta = (T_{13_e} - T_{13_s}) \cdot c_{p_{13}} \cdot m_{dot} / (800 \cdot 1,2 \cdot 2,35) \cdot 100$

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

### **Protótipo 5 (150l)**

#### "Procedimentos"

```
Procedure k(Rac;Lambda_m;Pr_m:lambda_eff)
If Rac>100 then
lambda_eff=lambda_m*0,386*(Pr_m/(0,861+Pr_m))^0,25*Rac^0,25
else
lambda_eff=lambda_m
endif
end
```

#### "Dados"

```
P_5=101 [kPa]
epsilon_4=0,002 [mm]
P_2=101 [kPa]
X_1=1,05 [m]
l=interpolate1('exterior','Rad';'Hora';hora=tempo/3600)
F_3_1=0,7
epsilon_3=0,9
sigma=5,729*10^(-8)
X_2=0,0045 [m]
D_1=0,022 [m]
rho_1=0,9 [Kg/m^3]
cp_5=4190 [KJ/Kg-K]
epsilon_1=0,1
X_3=1,250 [m]
V_dep=150[l]
P_dep=101 [kPa]
epsilon_dep=1
passo=60 [s]
P_13=101 [kPa]
T_13_e=T_5_s
D_2=0,0204 [m]
Y_1=2,45 [m]
D_4=0,025 [m]
L_serp=15 [m]
lambda_14=0,035 [W/m-K]
v_2=interpolate1('exterior','vento';'Hora';hora=tempo/3600)
T_2=T_10
T_10=20
alpha_1=100 [W/m^2-K]
epsilon_14=0,1
L_dep=0,95
D_15=0,48
D_16=0,56
lambda_16=0,025
lambda_cobre=350 [W/(m^2*K)]
hora=tempo/3600
```

#### "Propriedades do tubo de vidro"

```
D_6=0,04 [m]
D_5=0,037 [m]
epsilon_vidro=0,5
alpha_vidro=0,085
tau_vidro=0,85
lambda_vidro=1,2 [W/(m^2 K)]
```

#### "Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior do absorvedor"

```
call PipeFlow('water';T_5;P_5;m_dot;D_2;Y_1;epsilon_4/(D_2*1000):h_T_5; h_H_5 ;DELTAP_5;
Nusselt_T_5; f_5; Re_5)
alpha_4=h_H_5
```

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

"Cálculo do caudal que circula no colector"

"Bomba"

$m_{\dot{}} = Q_{\dot{}} * 998,2 / 3600$

$(\Delta T_{p5} + \Delta T_{corrugado}) * 1000 / (9,807 * 1000) = -2,78 * Q_{\dot{}}^3 + 9,52 * Q_{\dot{}}^2 - 11,23 * Q_{\dot{}} + 4,21$  " I Wilo"

"Cálculo da perda de carga no tubo corrugado"

call PipeFlow('water'; T\_5; P\_5; m\_dot; 0,018; 15; 0,002/0,018; h\_T\_corrugado; h\_H\_corrugado;  $\Delta T_{corrugado}$ ; Nusselt\_T\_corrugado; f\_corrugado; Re\_corrugado)

"Cálculo do coeficiente de convecção no exterior do absorvedor"

Call External\_Flow\_Cylinder('air'; T\_2; T\_17; P\_2; v\_2; D\_5: F\_d/L\_17; h\_17; C\_d\_17; Nusselt\_17; Re\_17) "Convecção Forçada"

$\alpha_{17} = h_{17}$

$\alpha_{20} = h_{17}$

$T_{vidro} = (T_{18} + T_{19}) / 2$

$T_{cobre} = (T_3 + T_7) / 2$

$BETA = 1 / ((T_{vidro} + T_{cobre}) / 2 + 273,15)$

$L = (D_6 - D_1) / 2$  [m]

$g = 9,807$  [m<sup>2</sup>/s]

$\mu_m = \text{Viscosity}(\text{Air}; T = (T_{vidro} + T_{cobre}) / 2)$

$\rho_m = \text{Density}(\text{Air}; T = (T_{vidro} + T_{cobre}) / 2; P = P_2)$

$\nu_m = \mu_m / \rho_m$

$Pr_m = \text{Prandtl}(\text{Air}; T = (T_{vidro} + T_{cobre}) / 2)$

$\lambda_m = \text{Conductivity}(\text{Air}; T = (T_{vidro} + T_{cobre}) / 2)$

$Ra_L = (g * BETA * (T_{cobre} - T_{vidro}) * L^3) / (\nu_m^2 * Pr_m)$

$Rac = (\ln(D_1/D_6))^4 / (L^3 * (D_1^{-3/5} + D_6^{-3/5})^5) * Ra_L$

call k(Rac;  $\lambda_m$ ;  $Pr_m$ ;  $\lambda_{eff}$ )

"Ponto 17"

$Rad * \rho_1 * \alpha_{vidro} + \lambda_{vidro} * \pi * Y_1 * (T_{18} - T_{17}) / \ln(D_5/D_6) = 5,27e-$

$8 * \epsilon_{vidro} * \pi * D_5 / 2 * Y_1 * ((T_{17} + 273,15)^4 - (T_{10} + 273,15)^4) + \alpha_{17} * D_5 * \pi * Y_1 * (T_{17} - T_2)$

"ponto 18"

$5,27e-8 * \alpha_{vidro} * \pi * D_6 / 2 * Y_1 * ((T_3 + 273,15)^4 - (T_{18} + 273,15)^4) + \lambda_{eff} * \pi * Y_1 * (T_3 - T_{18}) / \ln(D_6/D_1) = \lambda_{vidro} * \pi * Y_1 * (T_{18} - T_{17}) / \ln(D_5/D_6)$

"ponto 19"

$5,27e-8 * \alpha_{vidro} * \pi * D_6 / 2 * Y_1 * ((T_7 + 273,15)^4 - (T_{19} + 273,15)^4) + \lambda_{eff} * \pi * Y_1 * (T_7 - T_{19}) / \ln(D_6/D_1) = \lambda_{vidro} * \pi * Y_1 * (T_{19} - T_{20}) / \ln(D_5/D_6)$

"ponto20"

$I * \alpha_{vidro} * D_5 * Y_1 + \lambda_{vidro} * \pi * Y_1 * (T_{19} - T_{20}) / \ln(D_5/D_6) = 5,27e-$

$8 * \epsilon_{vidro} * \pi * D_5 / 2 * Y_1 * ((T_{20} + 273,15)^4 - (T_9 + 273,15)^4) + \alpha_{20} * D_5 * \pi / 2 * Y_1 * (T_{20} - T_2)$

"Considerações"

$T_3 = T_4$

$T_{5e} = T_{13s}$

"Balanço térmico no absorvedor"

$Rad = I * X_1 * Y_1$

$Q_{rad3} = \epsilon_3 * \pi * D_1 * Y_1 * 5,27e-8 * ((T_3 + 273,15)^4 - (T_{17} + 273,15)^4)$

$Rad * \epsilon_3 * \rho_1 * \tau_{vidro} = Q_{rad3} + \lambda_{eff} * \pi * Y_1 * (T_3 - T_{17}) / \ln(D_5/D_1) / 2 + Q_{conv4} + Q_{cond37}$

$Q_{conv4} = \alpha_4 * \pi * D_2 * Y_1 * (T_4 - T_5)$

$Q_{conv4} = m_{\dot{}} * c_{p5} * (T_{5s} - T_{5e})$

$T_5 = (T_{5e} + T_{5s}) / 2$

$\epsilon_3 = \epsilon_7$

$Q_{cond37} = \lambda_{cobre} / (\pi * (D_1 + D_2) / 2) * ((D_1 - D_2) * Y_1) * (T_3 - T_7)$

$Q_{conv7} = \alpha_4 * \pi * D_2 * Y_1 * (T_7 - T_5)$

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

```
Q_rad_7=epsilon_7*5,27e-8*((T_7+273,15)^4-(T_17+273,15)^4)
Q_cond_3_7+I*D_1*Y_1*epsilon_7*tau_vidro=Q_rad_7+lambda_eff*pi*Y_1*(T_7-
T_19)/ln(D_5/D_1)/2+Q_conv_7
```

### "Balanço térmico no concentrador"

```
T_1=T_10
T_9=0,0552*T_2^1,5
```

### "Balanço térmico no deposito"

```
rho_dep=Density(Water;T=T_dep_0;P=P_dep)
cp_dep=Cp(Water;T=T_dep_0;P=P_dep)*1000
cp_13=Cp(Water;T=(T_13_e+T_13_s)/2;P=P_13)*1000
M_dep=V_dep*rho_dep/1000
linha=tempo/passo+1
T_dep_0=Tablevalue('table 1';linha-1;#T_dep)
epsilon_dep=(T_13_e-T_13_s)/(T_13_e-T_dep_0)
M_dep*cp_dep*dTdt=(T_13_e-T_13_s)*cp_13*m_dot-Q_conv_16_2
T_dep=T_dep_0+dTdt*passo
```

```
Call FC_plate_vertical('water'; T_15; T_dep; P_dep; L_dep: h_15; Nusselt_15; Ra_15)
Call External_Flow_Cylinder('air'; T_2; T_16; P_2; v_2; D_16: F_d\L_16; h_16; C_d_16; Nusselt_16;
Re_16)
alpha_15=h_15
alpha_16=h_16
Q_conv_dep_16=Q_cond_15_16
Q_cond_15_16=Q_conv_16_2
```

```
Q_conv_dep_16=alpha_15*(pi*D_15*L_dep+2*pi*D_15^2/4)*(T_dep-T_15)
Q_cond_15_16=lambda_16*2*pi*L_dep*(T_15-T_16)/ln((D_16/2)/(D_15/2))
Q_conv_16_2=alpha_16*(pi*D_16*L_dep+2*pi*D_16^2/4)*(T_16-T_2)
eta=(T_13_e-T_13_s)*cp_13*m_dot/(800*1,2^2,35)*100
```



### **Protótipo 5 (500l)**

#### **"Procedimentos"**

```
Procedure k(Rac;Lambda_m;Pr_m:lambda_eff)
If Rac>100 then
lambda_eff=lambda_m*0,386*(Pr_m/(0,861+Pr_m))^0,25*Rac^0,25
else
lambda_eff=lambda_m
endif
end
```

#### **"Dados"**

```
P_5=101 [kPa]
epsilon_4=0,002 [mm]
P_2=101 [kPa]
X_1=1,05 [m]
l=800
F_3_1=0,7
epsilon_3=0,9
sigma=5,729*10^(-8)
X_2=0,0045 [m]
D_1=0,022 [m]
rho_1=0,9 [Kg/m^3]
cp_5=4190 [KJ/Kg-K]
epsilon_1=0,1
X_3=1,250 [m]
V_dep=500[l]
P_dep=101 [kPa]
epsilon_dep=1
passo=60 [s]
P_13=101 [kPa]
T_13_e=T_5_s
D_2=0,0204 [m]
Y_1=2,35 [m]
D_4=0,025 [m]
L_serp=15 [m]
lambda_14=0,035 [W/m-K]
v_2=interpolate1('exterior';'vento';'Hora';hora=tempo/3600)
T_2=T_10
T_10=20
alpha_1=100 [W/m^2-K]
epsilon_14=0,1
L_dep=1,695
D_15=0,65
D_16=0,73
lambda_16=0,025
lambda_cobre=350 [W/(m^2*K)]
hora=tempo/3600
```

#### **"Propriedades do tubo de vidro"**

```
D_6=0,04 [m]
D_5=0,037 [m]
epsilon_vidro=0,5
alpha_vidro=0,1
tau_vidro=0,79
lambda_vidro=1 [W/(m^2 K)]
```

#### **"Cálculo do coeficiente de convecção e perda de carga no interior do absorvedor"**

```
call PipeFlow('water';T_5;P_5;m_dot;D_2;Y_1;epsilon_4/(D_2*1000):h_T_5; h_H_5 ;DELTAP_5;
Nusselt_T_5; f_5; Re_5)
alpha_4=h_H_5
```

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

"Cálculo do caudal que circula no colector"

"Bomba"

$m_{\dot{}} = Q_{\dot{}} \cdot 998,2 / 3600$   
 $(\Delta TAP_5 + \Delta TAP_{\text{corrugado}}) \cdot 1000 / (9,807 \cdot 1000) = -2,78 \cdot Q_{\dot{}}^3 + 9,52 \cdot Q_{\dot{}}^2 - 11,23 \cdot Q_{\dot{}} + 4,21$  "I Wilo"

"Cálculo da perda de carga no tubo corrugado"

call PipeFlow('water'; T\_5; P\_5; m\_dot; 0,018; 15; 0,002/0,018; h\_T\_corrugado; h\_H\_corrugado  
; DELTAP\_corrugado; Nusselt\_T\_corrugado; f\_corrugado; Re\_corrugado)

"Cálculo do coeficiente de convecção no exterior do absorvedor"

Call External\_Flow\_Cylinder('air'; T\_2; T\_17; P\_2; v\_2; D\_5: F\_d\L\_17; h\_17; C\_d\_17; Nusselt\_17; Re\_17) "Convecção Forçada"

$\alpha_{17} = h_{17}$   
 $\alpha_{20} = h_{17}$   
 $T_{\text{vidro}} = (T_{18} + T_{19}) / 2$   
 $T_{\text{cobre}} = (T_3 + T_7) / 2$   
 $BETA = 1 / ((T_{\text{vidro}} + T_{\text{cobre}}) / 2 + 273,15)$   
 $L = (D_6 - D_1) / 2$  [m]  
 $g = 9,807$  [m<sup>2</sup>/s]  
 $\mu_m = \text{Viscosity}(\text{Air}; T = (T_{\text{vidro}} + T_{\text{cobre}}) / 2)$   
 $\rho_m = \text{Density}(\text{Air}; T = (T_{\text{vidro}} + T_{\text{cobre}}) / 2; P = P_2)$   
 $\nu_m = \mu_m / \rho_m$   
 $Pr_m = \text{Prandtl}(\text{Air}; T = (T_{\text{vidro}} + T_{\text{cobre}}) / 2)$   
 $\lambda_m = \text{Conductivity}(\text{Air}; T = (T_{\text{vidro}} + T_{\text{cobre}}) / 2)$   
 $Ra_L = (g \cdot BETA \cdot (T_{\text{cobre}} - T_{\text{vidro}}) \cdot L^3) / (\nu_m^2 \cdot Pr_m)$   
 $Rac = (\ln(D_1 / D_6))^4 / (L^3 \cdot (D_1^{(-3/5)} + D_6^{(-3/5)})^5) \cdot Ra_L$   
call k(Rac; Lambda\_m; Pr\_m: lambda\_eff)

"Ponto 17"

$Rad \cdot \rho_1 \cdot \alpha_{\text{vidro}} + \lambda_{\text{vidro}} \cdot \pi \cdot Y_1 \cdot (T_{18} - T_{17}) / \ln(D_5 / D_6) = 5,27e-8 \cdot \epsilon_{\text{vidro}} \cdot \pi \cdot D_5 / 2 \cdot Y_1 \cdot ((T_{17} + 273,15)^4 - (T_{10} + 273,15)^4) + \alpha_{17} \cdot D_5 \cdot \pi \cdot Y_1 \cdot (T_{17} - T_2)$

"ponto 18"

$5,27e-8 \cdot \alpha_{\text{vidro}} \cdot \pi \cdot D_6 / 2 \cdot Y_1 \cdot ((T_3 + 273,15)^4 - (T_{18} + 273,15)^4) + \lambda_{\text{eff}} \cdot \pi \cdot Y_1 \cdot (T_3 - T_{18}) / \ln(D_6 / D_1) = \lambda_{\text{vidro}} \cdot \pi \cdot Y_1 \cdot (T_{18} - T_{17}) / \ln(D_5 / D_6)$

"ponto 19"

$5,27e-8 \cdot \alpha_{\text{vidro}} \cdot \pi \cdot D_6 / 2 \cdot Y_1 \cdot ((T_7 + 273,15)^4 - (T_{19} + 273,15)^4) + \lambda_{\text{eff}} \cdot \pi \cdot Y_1 \cdot (T_7 - T_{19}) / \ln(D_6 / D_1) = \lambda_{\text{vidro}} \cdot \pi \cdot Y_1 \cdot (T_{19} - T_{20}) / \ln(D_5 / D_6)$

"ponto20"

$I \cdot \alpha_{\text{vidro}} \cdot D_5 \cdot Y_1 + \lambda_{\text{vidro}} \cdot \pi \cdot Y_1 \cdot (T_{19} - T_{20}) / \ln(D_5 / D_6) = 5,27e-8 \cdot \epsilon_{\text{vidro}} \cdot \pi \cdot D_5 / 2 \cdot Y_1 \cdot ((T_{20} + 273,15)^4 - (T_9 + 273,15)^4) + \alpha_{20} \cdot D_5 \cdot \pi \cdot Y_1 \cdot (T_{20} - T_2)$

"Considerações"

$T_3 = T_4$   
 $T_{5_e} = T_{13_s}$

"Balanço térmico no absorvedor"

$Rad = I \cdot X_1 \cdot Y_1$   
 $Q_{\text{rad}_3} = \epsilon_3 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot Y_1 \cdot 5,27e-8 \cdot ((T_3 + 273,15)^4 - (T_{17} + 273,15)^4)$   
 $Rad \cdot \epsilon_3 \cdot \rho_1 \cdot \tau_{\text{vidro}} = Q_{\text{rad}_3} + \lambda_{\text{eff}} \cdot \pi \cdot Y_1 \cdot (T_3 - T_{17}) / \ln(D_5 / D_1) / 2 + Q_{\text{conv}_4} + Q_{\text{cond}_3_7}$   
 $Q_{\text{conv}_4} = \alpha_4 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot Y_1 \cdot (T_4 - T_5)$   
 $Q_{\text{conv}_4} = m_{\dot{}} \cdot c_{p_5} \cdot (T_{5_s} - T_{5_e})$   
 $T_5 = (T_{5_e} + T_{5_s}) / 2$   
 $\epsilon_3 = \epsilon_7$   
 $Q_{\text{cond}_3_7} = \lambda_{\text{cobre}} / (\pi \cdot (D_1 + D_2) / 2) \cdot ((D_1 - D_2) \cdot Y_1) \cdot (T_3 - T_7)$   
 $Q_{\text{conv}_7} = \alpha_4 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot Y_1 \cdot (T_7 - T_5)$

## Desenvolvimento de um concentrador solar parabólico

```
Q_rad_7=epsilon_7*5,27e-8*((T_7+273,15)^4-(T_17+273,15)^4)
Q_cond_3_7+l*D_1*Y_1*epsilon_7*tau_vidro=Q_rad_7+lambda_eff*pi*Y_1*(T_7-
T_19)/ln(D_5/D_1)/2+Q_conv_7
```

### "Balanço térmico no concentrador"

```
T_1=T_10
T_9=0,0552*T_2^1,5
```

### "Balanço térmico no depósito"

```
rho_dep=Density(Water;T=T_dep_0;P=P_dep)
cp_dep=Cp(Water;T=T_dep_0;P=P_dep)*1000
cp_13=Cp(Water;T=(T_13_e+T_13_s)/2;P=P_13)*1000
M_dep=V_dep*rho_dep/1000
linha=tempo/passo+1
T_dep_0=Tablevalue('table 1';linha-1;#T_dep)
epsilon_dep=(T_13_e-T_13_s)/(T_13_e-T_dep_0)
M_dep*cp_dep*dTdt=(T_13_e-T_13_s)*cp_13*m_dot-Q_conv_16_2
T_dep=T_dep_0+dTdt*passo

Call FC_plate_vertical('water'; T_15; T_dep; P_dep; L_dep: h_15; Nusselt_15; Ra_15)
Call External_Flow_Cylinder('air'; T_2; T_16; P_2; v_2; D_16: F_d\L_16; h_16; C_d_16; Nusselt_16;
Re_16)
alpha_15=h_15
alpha_16=h_16
Q_conv_dep_16=Q_cond_15_16
Q_cond_15_16=Q_conv_16_2

Q_conv_dep_16=alpha_15*(pi*D_15*L_dep+2*pi*D_15^2/4)*(T_dep-T_15)
Q_cond_15_16=lambda_16*2*pi*L_dep*(T_15-T_16)/ln((D_16/2)/(D_15/2))
Q_conv_16_2=alpha_16*(pi*D_16*L_dep+2*pi*D_16^2/4)*(T_16-T_2)
eta=(T_13_e-T_13_s)*cp_13*m_dot/(800*1,2*2,35)*100
```



## 12. Anexo C

Neste anexo são apresentados alguns desenhos efectuados em software 3D, quer para o protótipo actual quer para aspecto que deverá ter o protótipo final.

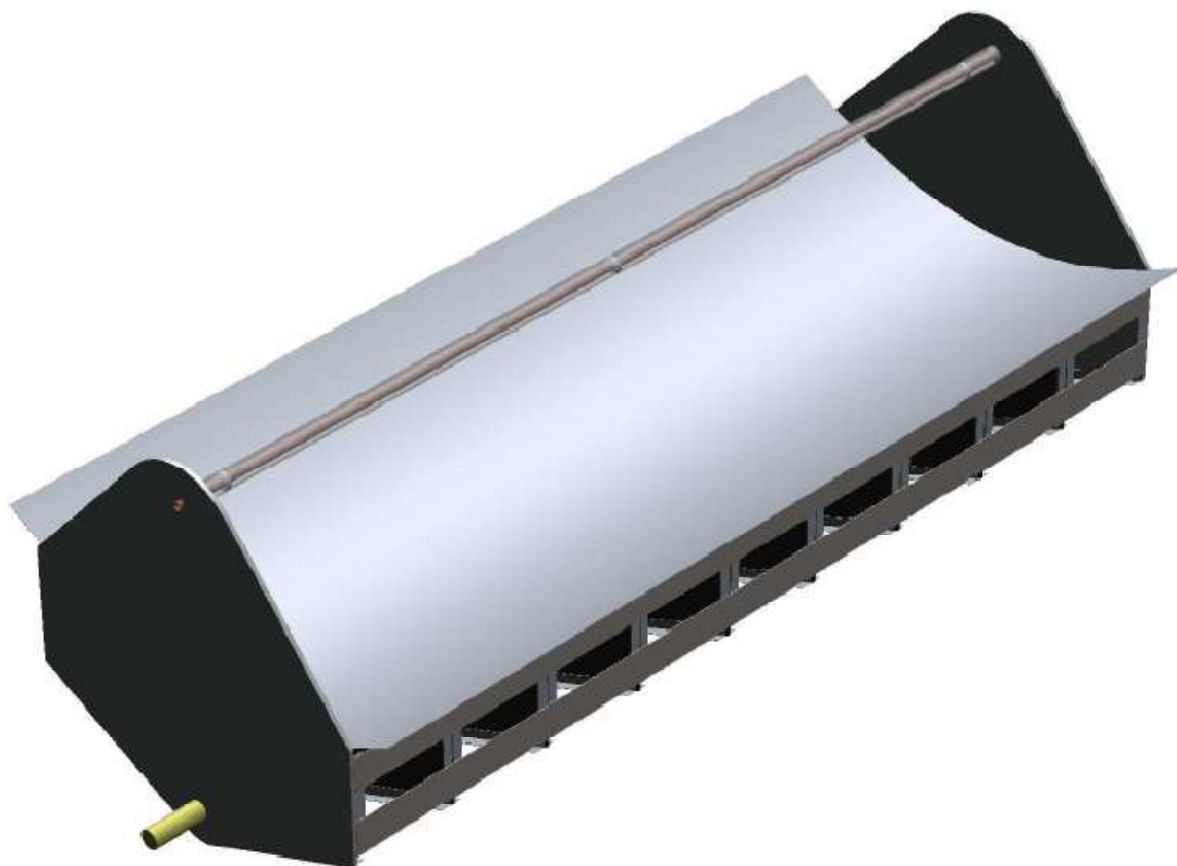


Imagem 3 – Protótipo 5

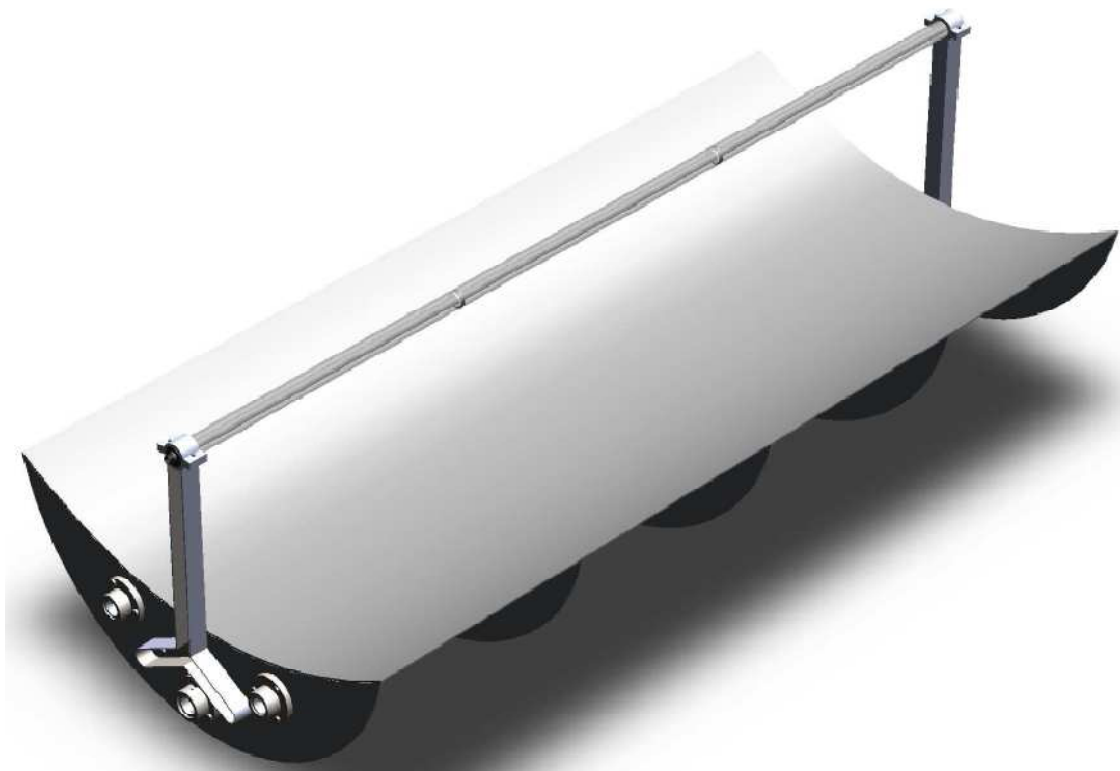


Imagem 2 – Proposta para aspecto e soluções construtivas do produto final

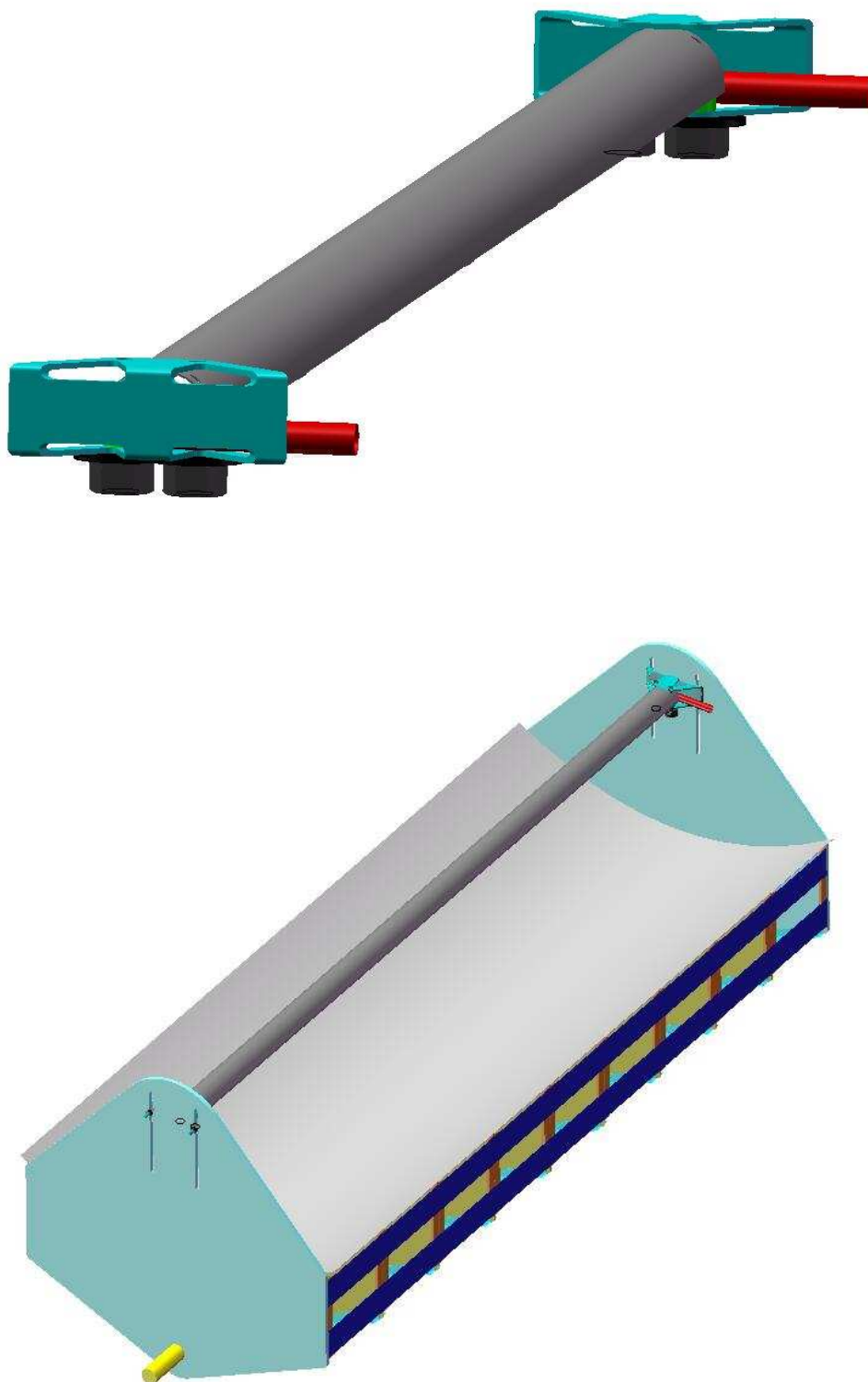


Figura 131 - Protótipo 1 e 4

## Anexo D

Neste anexo são apresentados os resultados dos testes efectuados durante este trabalho aos protótipos. Para melhor se perceber os resultados, foram colocados os resultados por protótipo. Alguns resultados não foram apresentados no trabalho porque apresentavam alguma falha importante, como por exemplo:

- As condições climáticas não eram as melhores,
- Aconteceu algum problema com o equipamento,
- Dados com espaçamento temporal bastante elevado.

### Protótipo 1

Tabela 6 - Resultados do protótipo 1

Tempo	T_tanque
10:00	20
10:30	21
11:00	22
11:30	25
12:00	24
12:30	25
13:00	28
13:30	30
14:00	29
14:30	28
15:00	30
15:30	31
16:00	32
16:30	32
17:00	31
17:30	31

Protótipo 1	T_tanque
10:00	15
10:30	16
11:00	-
11:30	-
12:00	18
12:30	18,5
13:00	19
13:30	19
14:00	21
14:30	22
15:00	-
15:30	23
16:00	24
16:30	23

**Protótipo 2**

Tabela 7 - Resultados do protótipo 2

Tempo	T <sub>E</sub>	T <sub>S</sub>	T <sub>t</sub>	Q (T <sub>s</sub> - T <sub>e</sub> )	Radiação solar I <sub>h</sub> (referência)	Pelo ΔT η (Rabl)	Pelo tanque η (Rabl)
10:00	19	20	20	0,56	800,00	24,76	
10:30	20	22	21	1,12	800,00	49,51	15,47
11:00	21	23	22	1,12	800,00	49,51	15,47
11:30	23	23	23	0,00	800,00	0,00	15,47
12:00	23	25	23	1,12	800,00	49,51	0,00
12:30	24	26	25	1,12	800,00	49,51	30,93
13:00	25	26	25	0,56	800,00	24,76	0,00
13:30	25	26	26	0,56	800,00	24,76	15,47
14:00	25	25	26	0,00	800,00	0,00	0,00
14:30	25	26	26	0,56	800,00	24,76	0,00
15:00	26	25	27	-0,56	800,00	-24,76	15,47
15:30	26	27	27	0,56	800,00	24,76	0,00
16:00	26	26	27	0,00	800,00	0,00	0,00
16:30	26	25	27	-0,56	800,00	-24,76	0,00
17:00	24	26	26	1,12	800,00	49,51	-15,47
17:30	26	28	27	1,12	800,00	49,51	15,47
18:00	26	26	28	0,00	800,00	0,00	15,47
18:30	26	25	26	-0,56	800,00	-24,76	-30,93
19:00	26	25	26	-0,56	800,00	-24,76	0,00
19:30	25	25	25	0,00	800,00	0,00	-15,47



**Protótipo 3**

Tabela 8 - Resultados do protótipo 3

Tempo	T <sub>E</sub>	T <sub>S</sub>	T <sub>t</sub>	Q (T <sub>s</sub> - T <sub>e</sub> )	Radiação solar	Pelo ΔT		T <sub>tanque</sub>
					I <sub>h</sub> (lida)	η (Rabl)	η (Dufie)	
9:30	17	18	17	0,56	800,00	24,76		
10:00	17	18,5	18	0,84	800,00	37,14		15,47
10:30	18	19	19	0,56	800,00	24,76		15,47
11:00	18	22	20	2,23	800,00	99,03		15,47
11:30	25	25	26	0,00	800,00	0,00		92,79
12:00	30	33	31,5	1,68	800,00	74,27		85,06
12:30	35	37	36,5	1,12	800,00	49,51		77,33
13:00	40	42	41	1,12	800,00	49,51		69,59
13:30	44	47	45,5	1,68	800,00	74,27		69,59
14:00	49	51	50	1,12	800,00	49,51		69,59
14:30	53	56	54	1,68	800,00	74,27		61,86
15:00	56	56	58	0,00	800,00	0,00		61,86
15:30	56	57	57	0,56	800,00	24,76		-15,47
16:00	56	56	57	0,00	800,00	0,00		0,00
16:30	56	55	57	-0,56	800,00	-24,76		0,00
17:00	56	54	56	-1,12	800,00	-49,51		-15,47
17:30	55	53	55	-1,12	800,00	-49,51		-15,47
18:00	54	52	54	-1,12	800,00	-49,51		-15,47
18:30	53	50	52	-1,68	800,00	-74,27		-30,93
19:00	51	49	50	-1,12	800,00	-49,51		-30,93

**Protótipo 4 500l**

Tabela 9 - Resultados para o protótipo 4 com acumulador de 500l

Tempo	T <sub>E</sub>	T <sub>S</sub>	T <sub>t</sub>	Q	Radiação solar			Pelo $\Delta T$		T <sub>tanque</sub>	
					I <sub>h</sub> (lida)	I <sub>b</sub> (Rabl)	I <sub>b</sub> (Dufie)	$\eta$ (Rabl)	$\eta$ (Dufie)	$\eta$ (Rabl)	$\eta$ (Dufie)
29-5-09 8:00	22	24	24	1,04	282,00	580,00	558,00	63,74	66,25		
29-5-09 8:30	24	26	24	1,04	378,00	649,00	646,00	56,96	57,23	0,00	0,00
29-5-09 9:00	26	28	25	1,04	466,00	677,00	682,00	54,61	54,21	60,92	60,47
29-5-09 9:30	27,5	29,5	27	1,04	553,00	705,00	717,00	52,44	51,56	117,00	115,04
29-5-09 10:00	29,5	31	28	0,78	657,00	777,00	798,00	35,68	34,74	53,08	51,68
29-5-09 10:30	30,5	32	30	0,78	732,00	790,00	812,00	35,10	34,15	104,41	101,58
29-5-09 11:00	32	34	30	1,04	793,00	791,00	813,00	46,74	45,47	0,00	0,00
29-5-09 11:30	34	36	32	1,04	846,00	794,00	816,00	46,56	45,30	103,88	101,08
29-5-09 12:00	35	37	32	1,04	889,00	798,00	819,00	46,33	45,14	0,00	0,00
29-5-09 12:30	36	38	34	1,04	901,00	768,00	789,00	48,14	46,85	107,40	104,54
29-5-09 13:00	37,5	39,5	35	1,04	930,00	785,00	807,00	47,09	45,81	52,54	51,10
29-5-09 13:30	38,5	41	36	1,30	961,00	803,00	843,00	57,55	54,82	51,36	48,92
29-5-09 14:00	40	42	37	1,04	964,00	805,00	854,00	45,92	43,29	51,23	48,29
29-5-09 14:30	40,5	42,5	38	1,04	931,00	801,00	833,00	46,15	44,38	51,49	49,51
29-5-09 15:00	42	44	39	1,04	897,00	799,00	826,00	46,27	44,76	51,62	49,93
29-5-09 15:30	43	45	40	1,04	841,00	786,00	808,00	47,03	45,75	52,47	51,04
29-5-09 16:00	44	45,5	41	0,78	799,00	792,00	814,00	35,01	34,06	52,07	50,66
29-5-09 16:30	44,5	46,5	43	1,04	734,00	782,00	804,00	47,27	45,98	105,48	102,59
29-5-09 17:00	45	47	43	1,04	664,00	777,00	799,00	47,58	46,27	0,00	0,00
29-5-09 17:30	46	46	45	0,00	586,00	770,00	791,00	0,00	0,00	107,12	104,28
29-5-09 18:00	46	47	43	0,52	511,00	786,00	808,00	23,52	22,88	-104,94	-102,08
29-5-09 18:30	48	49,5	44	0,78	402,00	706,00	718,00	39,27	38,62	58,42	57,44
30-5-09 11:00	49	50,5	44	0,78	795,00	793,00	815,00	34,96	34,02		
30-5-09 11:30	50	52	45	1,04	848,00	797,00	818,00	46,38	45,19	51,75	50,42
30-5-09 12:00	51	53	46	1,04	900,00	801,00	835,00	46,15	44,27	51,49	49,39
30-5-09 12:30	52	55	48	1,56	932,00	801,00	837,00	69,23	66,25	102,97	98,55
30-5-09 13:00	54	57	49	1,56	964,00	805,00	855,00	68,89	64,86	51,23	48,24
30-5-09 13:30	55	58	51	1,56	961,00	802,00	842,00	69,14	65,86	102,85	97,96
30-5-09 14:00	57	60	51	1,56	952,00	801,00	837,00	69,23	66,25	0,00	0,00
30-5-09 14:30	58	61	52	1,56	942,00	803,00	848,00	69,06	65,39	51,36	48,63
30-5-09 15:00	60,5	62	53	0,78	887,00	787,00	808,00	35,23	34,31	52,40	51,04
30-5-09 15:30	61	63	54	1,04	842,00	777,00	799,00	47,58	46,27	53,08	51,62
30-5-09 16:00	61	64	56	1,56	813,00	801,00	836,00	69,23	66,33	102,97	98,66
30-5-09 16:30	62	64,5	56	1,30	738,00	787,00	809,00	58,72	57,12	0,00	0,00
30-5-09 17:00	63	65	57	1,04	652,00	748,00	767,00	49,42	63,25	55,14	53,77
30-5-09 17:30	62	64	58	1,04	579,00	749,00	768,00	49,36	71,23	55,06	53,70
30-5-09 18:00	63	65	59	1,04	489,00	718,00	732,00	51,49	84,34	57,44	56,34

**Protótipo 4 150l**

Tabela 10 - Resultados para o protótipo 4 com acumulador de 150l a baixas temperaturas

Tempo	T <sub>E</sub>	T <sub>S</sub>	T <sub>t</sub>	Q (T <sub>s</sub> -T <sub>e</sub> )	Radiação solar			Pelo ΔT		T <sub>tanque</sub>	
					I <sub>h</sub> (lida)	I <sub>b</sub> (Rabl)	I <sub>b</sub> (Dufie)	η (Rabl)	η (Dufie)	η (Rabl)	η (Dufie)
12-6-09 8:00	11	13,5	17,5								
12-6-09 8:30	12	14,5	18	0,00	350,00	521,00	490,00	0,00	0,00	11,87	12,62
12-6-09 9:00	18	22,5	20,5	1,12	461,00	646,00	643,00	61,32	61,60	47,88	48,10
12-6-09 9:40	22	26	24	0,84	575,00	687,00	695,00	43,24	42,75	47,27	46,73
12-6-09 10:00	25	29,5	27	1,12	649,00	748,00	768,00	52,96	51,58	74,43	72,49
12-6-09 10:30	27,5	32	30,5	1,12	725,00	767,00	788,00	51,64	50,27	56,46	54,95
12-6-09 11:00	31	35	34	0,84	800,00	795,00	817,00	37,37	36,36	54,47	53,00
12-6-09 11:30	34	38,5	38,5	1,12	839,00	773,00	795,00	51,24	49,83	72,03	70,03
12-6-09 12:00	37,5	42	41,5	1,12	886,00	784,00	805,00	50,52	49,21	47,34	46,11
12-6-09 12:30	41	46	44,5	1,40	922,00	793,00	814,00	62,44	60,83	46,81	45,60
12-6-09 13:00	45	49	48	0,84	953,00	798,00	832,00	37,23	35,71	54,26	52,05
12-6-09 13:30	48	52	51	0,84	963,00	799,00	835,00	37,18	35,58	46,45	44,45
12-6-09 13:50	51	55	53,5	0,84	967,00	800,00	843,00	37,14	35,24	58,00	55,04
12-6-09 14:40	56	60	58,5	0,84	950,00	803,00	857,00	37,00	34,67	46,22	43,31
12-6-09 15:00	57,2	62	60	1,28	933,00	804,00	861,00	56,66	52,91	34,62	32,33
12-6-09 15:30	60	64	62,5	0,84	890,00	803,00	857,00	37,00	34,67	38,52	36,09
12-6-09 16:00	63	67	64	0,84	831,00	801,00	845,00	37,09	35,16	23,17	21,96
12-6-09 16:30	66	70	65,5	0,84	753,00	790,00	812,00	37,61	36,59	23,49	22,86
12-6-09 17:00	68	71	67	0,28	698,00	799,00	836,00	12,39	11,85	23,23	22,20
12-6-09 17:30	70	73	68,5	0,28	609,00	783,00	805,00	12,65	12,30	23,70	23,05
12-6-09 18:00	72,5	74,5	70	-0,28	517,00	749,00	769,00	-13,22	-12,88	24,78	24,13
12-6-09 18:20	72	75	70,5	0,28	461,00	745,00	764,00	13,29	12,96	12,46	12,15

Tabela 11 - Resultados para o protótipo 4 com acumulador de 150l a altas temperaturas

Tempo	T <sub>E</sub>	T <sub>S</sub>	T <sub>t</sub>	Q (T <sub>s</sub> -T <sub>e</sub> )	Radiação solar			Pelo ΔT		T <sub>tanque</sub>	
					I <sub>h</sub> (lida)	I <sub>b</sub> (Rabl)	I <sub>b</sub> (Dufie)	η (Rabl)	η (Dufie)	η (Rabl)	η (Dufie)
13-6-09 11:00	59	62	58	1,68	763,00	726,00	743,00	81,84	79,97		
13-6-09 11:30	61,5	64	62,5	1,40	897,00	809,00	879,00	61,20	56,33	68,82	63,34
13-6-09 12:00	63	65	63,5	1,12	755,00	561,00	537,00	70,61	73,76	16,54	17,28
13-6-09 12:30	64	65	64,5	0,56	966,00	807,00	872,00	24,54	22,71	23,00	21,28
13-6-09 13:00	65	67	64,5	1,12	729,00	439,00	400,00	90,23	99,03	0,00	0,00
13-6-09 13:30	65	68	65	1,68	887,00	696,00	706,00	85,37	84,16	8,89	8,76
13-6-09 14:00	66	69	65,5	1,68	1005,00	812,00	886,00	73,17	67,06	7,62	6,98
13-6-09 14:30	67	69	66,5	1,12	750,00	496,00	462,00	79,86	85,74	24,94	26,78
13-6-09 15:00	66	68	65	1,12	826,00	670,00	673,00	59,12	58,86	-27,70	-27,58

**Protótipo 5 temperaturas baixas**

Tabela 12 - Resultados para protótipo 5 com o acumulador de 150l a baixas temperaturas

Tempo	T <sub>E</sub>	T <sub>S</sub>	T <sub>t</sub>	Q (T <sub>s</sub> -T <sub>e</sub> )	Radiação solar			Pelo ΔT		T <sub>tanque</sub>	
					I <sub>h</sub> (lida)	I <sub>b</sub> (Rabl)	I <sub>b</sub> (Dufie)	η (Rabl)	η (Dufie)	η (Rabl)	η (Dufie)
29-6-09 8:00	22	27	24,5	1,40	374,00	625,00	616,00				
29-6-09 8:30	25	30	27	1,40	450,00	624,00	614,00	79,35	80,64	49,57	50,38
29-6-09 9:00	29	34	31	1,40	585,00	719,00	734,00	68,87	67,46	68,83	67,42
29-6-09 9:30	31	37	33	1,95	629,00	711,00	724,00	97,50	95,75	34,80	34,18
29-6-09 10:00	33	39	37	1,95	908,00	799,00	884,00	86,76	78,42	61,94	55,98
29-6-09 10:30	37	42	41	1,40	932,00	797,00	832,00	62,13	59,51	62,09	59,48
29-6-09 11:00	41	47	43,5	1,95	910,00	745,00	764,00	93,05	90,73	41,52	40,49
29-6-09 11:30	45	50	47	1,40	975,00	801,00	851,00	61,82	58,18	54,06	50,89
29-6-09 12:00	49	53	50	0,84	965,00	803,00	860,00	37,00	34,54	46,22	43,16
29-6-09 12:30	52	56	53	0,84	952,00	806,00	872,00	36,86	34,07	46,05	42,57
29-6-09 13:00	55	58	56	0,28	650,00	349,00	305,00	28,37	32,47	106,35	121,70
29-6-09 13:30	59	62	58	0,28	560,00	184,00	160,00	53,82	61,89	134,48	154,65
29-6-09 14:00	61	65	61	0,84	950,00	797,00	831,00	37,28	35,75	46,57	44,67
29-6-09 14:30	63	67	62,5	0,84	980,00	803,00	858,00	37,00	34,63	23,11	21,63
29-6-09 15:00	65	69	64	0,84	946,00	796,00	829,00	37,32	35,84	23,31	22,39
29-6-09 15:30	67	71	67	0,84	920,00	792,00	819,00	37,51	36,27	46,86	45,32
29-6-09 16:00	69	73	70	0,84	900,00	786,00	808,00	37,80	36,77	47,22	45,94
29-6-09 16:30	72	75	72	0,28	860,00	781,00	803,00	12,68	12,33	31,68	30,82
29-6-09 17:00	74	77	74	0,28	798,00	755,00	775,00	13,12	12,78	32,77	31,93
29-6-09 17:30	76	79	74,5	0,28	735,00	740,00	759,00	13,38	13,05	8,36	8,15
29-6-09 18:00	77,5	81	76,4	0,56	664,00	724,00	740,00	27,36	26,76	32,47	31,77
29-6-09 18:30	79	82,5	78	0,56	570,00	667,00	670,00	29,69	29,56	29,68	29,55
29-6-09 19:00	80	83	79	0,28	473,00	601,00	584,00	16,48	16,96	20,59	21,19

Tabela 13 - Resultados para protótipo 5 com o acumulador de 150l a altas temperaturas

Tempo	T <sub>E</sub>	T <sub>S</sub>	T <sub>t</sub>	Q (T <sub>s</sub> -T <sub>e</sub> )	Radiação solar			Pelo ΔT		T <sub>tanque</sub>	
					I <sub>h</sub> (lida)	I <sub>b</sub> (Rabl)	I <sub>b</sub> (Dufie)	η (Rabl)	η (Dufie)	η (Rabl)	η (Dufie)
10:10	74	77	72,5	0,56	657,00	751,00	771,00	26,37	25,69		
11:20	77	81	77	1,12	822,00	794,00	816,00	49,89	48,54	30,05	29,24
11:30	78	81,5	78	0,84	843,00	795,00	823,00	37,37	36,10	46,69	45,10
12:00	80	83	80	0,56	876,00	784,00	806,00	25,26	24,57	31,56	30,70
12:30	81,5	84,5	81	0,56	926,00	797,00	833,00	24,85	23,78	15,52	14,85
13:00	83	86,5	83	0,84	956,00	799,00	844,00	37,18	35,20	30,97	29,32
13:20	85	88	84	0,56	965,00	800,00	846,00	24,76	23,41	23,20	21,94
13:50	86	89	86	0,56	980,00	804,00	862,00	24,63	22,98	18,47	17,22
14:45	88	91	88	0,56	934,00	799,00	840,00	24,79	23,58	16,89	16,07
15:30	90	93	89	0,56	873,00	796,00	827,00	24,88	23,95	10,36	9,97
16:00	91	94	90	0,56	828,00	797,00	832,00	24,85	23,80	15,52	14,87
16:40	92,5	95	90,5	0,28	704,00	721,00	737,00	13,73	13,44	6,43	6,30
17:10	93	96	91	0,56	620,00	679,00	686,00	29,17	28,87	9,11	9,02
17:40	94	97	91,5	0,56	549,00	676,00	682,00	29,30	29,04	9,15	9,07